



ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ. ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ.
НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.
ДАНИЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ — 2020

ENERGY AND RESOURCE SAVING. POWER SUPPLY.
NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES.
NUCLEAR ENERGY. DANILOV READINGS — 2020

Сборник научных трудов

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Уральский энергетический институт

**Энерго- и ресурсосбережение.
Энергообеспечение. Нетрадиционные
и возобновляемые источники энергии.
Атомная энергетика.
Даниловские чтения — 2020**

**Energy and Resource Saving.
Power supply. Non-traditional
and Renewable Energy Sources.
Nuclear Energy.
Danilov Readings — 2020**

Сборник научных трудов

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 620.9:621.039

ББК 31.15+31.4

Э65

Рецензенты:

коллегия Ассоциации «Союз “Энергоэффективность”» (председатель коллегии: доктор физико-математических наук, доцент *С. Н. Мартюшов*);

кандидат экономических наук, преподаватель-эксперт в области внедрения энергоменеджмента на промышленных предприятиях (ФГАОУ ДПО «КПК ТЭК») *М. В. Степанова*

Редакционная коллегия:

В. Ю. Балдин, старший преподаватель кафедры тепловых электростанций УрФУ (ответственный за издание);

Г. И. Никитина, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций УрФУ;

И. С. Селезнева, доцент, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии органического синтеза УрФУ

Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2020 = Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2020 : сборник научных трудов / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, М-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 632 с.

ISBN 978-5-7996-3379-0

В сборник включены научные труды, представленные на Международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2020», отражающие широкий диапазон научно-исследовательских работ молодых ученых вузов, предприятий и организаций России, стран СНГ и дальнего зарубежья по заявленным проблемам.

Сборник адресован научным работникам, преподавателям, аспирантам и студентам, специализирующимся в области рассматриваемых тем.

Ответственность за содержание и оформление материалов несут авторы статей.

УДК 620.9:621.039

ББК 31.15+31.4

ISBN 978-5-7996-3379-0

© Авторы статей, текст, 2021

© Оформление. Уральский федеральный университет, 2021

*Сборник посвящается столетию
Уральского федерального университета
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина*

От редакционной коллегии сборника

В рамках Международного молодежного Даниловского энергетического форума 14–18 декабря 2020 г. в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия) прошла Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2020» как дань памяти основателю научно-методической школы энергосбережения и повышения энергетической эффективности, профессору Н. И. Данилову (1945–2015), посвященная отмеченному в 2020 г. столетию Уральского федерального университета (УрФУ).

На конференции были широко представлены результаты фундаментальных и прикладных научных разработок, выполненных в российских вузах и научных организациях с участием представителей ряда зарубежных стран по актуальной и перспективной тематике, отражающей мировые и отечественные тенденции в энергетике, промышленности, смежных отраслях, образовании, рассматривающие технические, экономические, экологические и социальные аспекты указанной проблематики.

Такая конференция проводится ежегодно в УрФУ более двадцати лет, вызывает неизменный интерес в России и за рубежом. В этот сборник вошли лучшие работы из представленных на конференции в 2020 г.

Организационный комитет конференции

Председатель — В. А. Кокшаров

Заместители председателя

А. В. Германенко А. В. Полтавец
С. Т. Князев А. В. Фаюстов

Ответственный секретарь — В. Ю. Балдин

Члены оргкомитета

Е. С. Авраменко	А. В. Корелин	Ф. Н. Сарапулов
Н. А. Абаймов	А. В. Костылев	И. С. Селезнева
В. А. Бегалов	А. В. Краснова	Г. А. Семенов
М. А. Безматерных	В. В. Лавров	В. А. Спиридонов
Д. А. Бенеманский	Б. Э. Любомудров	Н. А. Спирин
Т. Ф. Богатова	С. А. Май	О. Л. Ташлыков
Ю. М. Бродов	В. Ю. Малыгин	Ю. И. Толстова
С. А. Бычков	Е. А. Маляр	В. Г. Тупоногов
Н. В. Вальцев	В. А. Микула	С. Г. Тушин
А. И. Вальцева	В. А. Мунц	В. Э. Фризен
М. В. Вараксин	Ю. Е. Немихин	А. П. Хомяков
В. И. Велькин	А. Д. Никитин	Е. В. Черепанова
Е. С. Герасимова	Г. И. Никитина	Р. Н. Шарипов
В. А. Гольцев	В. А. Никулин	Д. В. Шатунова
Н. В. Гредасова	П. В. Осипов	О. Ю. Шешуков
А. М. Дубинин	Е. Ю. Павлюк	В. В. Шимов
Ф. Л. Капустин	А. В. Паздерин	Н. П. Ширяева
В. А. Климова	А. И. Попов	М. Е. Шнырев
С. Е. Кокин	А. С. Прошин	С. Е. Щеклеин
А. С. Колпаков	А. Ф. Рыжков	О. Л. Яковлев
Н. В. Колпакова	С. Ф. Сарапулов	

Содержание

Даниловские чтения — 2020. Вместо предисловия...	15
В. Ю. Балдин, Г. И. Никитина. Основные итоги Международного молодежного Даниловского энергетического форума — 2019.....	16
В. И. Фадеев. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности: реализация на территории Свердловской области	23
 Раздел 1. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности. Энергообеспечение	31
А. Е. Алексеев, П. Ю. Худяков. Разработка высокотемпературного теплообменника для нагрева CO ₂	32
А. А. Баскакова, Е. Г. Нешпоренко. Анализ тепловой комбинированной схемы обжига огнеупоров и сушки древесины	37
А. С. Блинков, Н. А. Спирин, И. А. Гурин. Оценка тепловых потерь в нижней части доменной печи	40
С. В. Богданец, В. Л. Блинов, А. И. Плотников, А. Д. Куракин, А. А. Лебедев, Е. Е. Пясецкий, К. А. Зотов. Применение цифрового двойника газотурбинной установки на этапе эксплуатации.....	45
В. А. Вавилов, С. С. Черепанов, И. И. Фахразиев, М. Е. Хвалько, Д. А. Хворенков. Разработка системы утилизации теплоты уходящих газов котельных установок с глубоким охлаждением продуктов сгорания.....	49
Е. А. Вараксина, А. А. Баскакова, С. В. Картавцев. Обжиг сидерита конвертерными газами	54
П. А. Вельчинская, Е. А. Бирюзова. Энергосбережение в теплоснабжении	58
А. В. Ворончихин, А. С. Колпаков. Повышение энергоэффективности системы вентиляции сварочно-сборочного цеха применением вихревой воздухоподдачи	62
Е. М. Демиденко, Е. А. Бирюзова. Анализ применения композитных материалов в системах теплоснабжения	67
А. С. Доронин, К. В. Трубицын, В. К. Ткачев. Проектирование водогрейного котла с целью повышения энергетической эффективности промышленного предприятия	71

Д. О. Забалуева, Э. В. Гиззатуллин, А. Ю. Коняев. Повышение эффективности электродинамической сепарации твердых отходов в бегущем магнитном поле	75
И. С. Зубков, П. И. Плишкин, Е. Ю. Искорцев, О. В. Беляев, В. Л. Блинов. Алгоритм учета влияния дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора.....	79
И. Ю. Зыкин, М. С. Соколова. Исследование возможности использования водоугольного топлива в котлах ТЭЦ ММК.....	83
Э. Э. Кабисова, К. А. Габараев, Б. В. Заоев, М. Т. Плиева. Анализ статистического исследования электрических нагрузок.....	87
Р. З. Касимов, А. А. Лебедева, Д. Н. Попов. Об одном подходе к расчету процесса плавления битума	92
Г. Г. Кикнавелидзе, Н. В. Колпакова. Возможность применения волнового криогенератора на объектах теплогазоснабжения.....	96
Д. А. Киргуев, Д. А. Кумсиев, А. Ф. Мисиков, О. А. Гаврина. Анализ спектра токов и напряжений потребителей металлургического предприятия	100
В. А. Кирьянов, Н. В. Вальцев. Перспективы создания энергоблоков на ультрасверхкритические параметры пара в России и мире	104
И. А. Кокулин, А. Е. Барочкин. Результаты внедрения концессионного соглашения в Ижевске	109
Д. Д. Коршунова, Е. П. Павлова, Н. В. Колпакова. Анализ эффективности установки каскадных крышных газовых котельных	112
А. В. Лаптева, В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, Я. М. Щелоков. Технологическое топливное число при добыче руды.....	116
Е. А. Лыскова, Д. М. Суворов. Переход на пониженный температурный график сетевой воды в системах теплоснабжения как актуальная проблема	120
Лю Цзиньюань, Т. Н. Жильникова, В. И. Велькин. Проектирование и автоматизированный расчет 19-этажного многоквартирного жилого дома	124
К. В. Мальцева, С. В. Придвижкин. Повышение энергоэффективности зданий при капитальном ремонте	129
Е. Н. Малявин, К. А. Никитенко, А. А. Бозиев, Р. В. Ключев. Анализ состояния рынка энергоресурсов в Республике Северная Осетия — Алания	134
Ю. С. Мороз, А. В. Никулин, Н. А. Третьякова. Рекуперация тепла...	138
И. О. Овчаров, Г. С. Шабалин. Автоматический пересчет уставок токовой отсечки	142

И. Н. Одинаев, А. В. Паздерин, П. В. Мурзин, Н. А. Морозенко. Компенсация погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения	147
В. С. Поздняков, А. С. Колпаков. Повышение энергоэффективности аппаратов воздушного охлаждения компрессорных станций магистральных газопроводов.....	152
С. Д. Ратманов, А. С. Колпаков. Оптимизация распределения потоков в детандерном ожижителе природного газа на ГРС.....	157
М. С. Редунова, Е. Ю. Павлюк. Определение зависимости температуры теплоносителя внутри трубопровода от времени	162
В. П. Рыбальская. Сетевые накопители в системах электроснабжения ...	166
Н. Ю. Сафонов, Г. С. Шабалин. Сравнение методов оценки вариантов развития сети, основанных на учете затрат.....	170
А. П. Симушин, Е. А. Бирюзова. Применение системы «Старт-Проф» при расчете трубопроводов тепловых сетей на прочность	175
Н. Р. Тазеев, В. С. Антонова, К. Х. Шайхитдинова, М. С. Соколова. Исследование влияния паропроизводительности котельного агрегата на удельный расход топлива	179
М. В. Трушков, А. С. Колпаков. Технологические аспекты малотоннажного производства СПГ на газораспределительных станциях.....	183
Е. Е. Тыбанова, З. Р. Муфтахутдинова. Объемно-планировочные мероприятия по энергосбережению.....	187
Е. В. Тюрин, А. С. Колпаков. Технологические возможности беструбопроводной газификации поселений с использованием СПГ	191
Г. А. Ульянов, Н. В. Колпакова. Преимущества установки коаксиальных дымоходов в котельных агрегатах с закрытой камерой сгорания.....	196
Ю. А. Фазылова, Е. Ю. Павлюк. К вопросу исследования наработки на отказ паропроводов тепловых электрических станций	200
С. С. Черепанов, М. М. Килина, В. А. Вавилов, И. И. Фахразиев, И. Н. Осипова. Модернизация теплового узла Ижевской ТЭЦ-2	204
С. С. Черепанов, В. А. Вавилов, И. И. Фахразиев, Д. А. Хворенков. Разработка конструкции радиатора отопления с низкопрофильным оребрением, обладающего улучшенными теплотехническими характеристиками	209
О. А. Чехранова, Е. Г. Гашо. Исследование и разработка схем теплоснабжения для эффективного использования энергоресурсов на примере Красноярска	213

А. А. Чечушкин, С. В. Картавец. Объемное охлаждение конвертерных газов.....	218
О. С. Чупракова, Е. А. Бирюзова. Исследование способов дезинфекции горячей воды в системе горячего водоснабжения от микробиологического заражения	220
Е. В. Шадчинева, Н. П. Ширяева. Расчет показателей надежности системы отопления поликлиники.....	224
С. В. Шаповалов, В. Г. Лисиенко, Р. П. Ижевский, Ю. Н. Чесноков, С. И. Холод, В. В. Рогачев. Оптимизация технологических параметров металлургических процессов методом имитационного моделирования	229
М. С. Шевелева, Е. А. Комаров. Анализ экономической целесообразности использования косвенного испарительного охлаждения в системах с большой холодильной мощностью	237
С. Е. Шендер, А. В. Паздерин. Применение РЭН-моделей в задаче достоверизации данных устройств синхронизированных векторных измерений	242
С. Е. Шендер, А. В. Паздерин. Сравнительный анализ методов расчета параметров векторов тока и напряжения на микропроцессорных терминалах релейной защиты и противоаварийной автоматики	246
С. И. Шкрылев, Ю. Г. Марченко, И. А. Калинин, В. В. Савченко, В. А. Седунин. Низкоскоростной испытательный стенд осевых компрессоров	250
Д. И. Щеглов, А. С. Колпаков. Повышение энергетических показателей ПГУ в летний период применением АБХМ.....	254

Раздел 2. Ресурсосбережение и повышение экологической эффективности.....	259
Ф. Х. Ф. Аль-Саиди, А. А. Кунгурова, С. Г. Власова. Кварцевый песок иракского месторождения как компонент шихты для стекольного производства.....	260
С. И. Астапчик, Е. О. Лаптева, А. Ю. Коняев. Применение электродинамических сепараторов для дометаллургической подготовки лома и отходов цветных металлов.....	264
А. А. Гетман, Г. С. Гиренко, Е. П. Фарафонтова, И. А. Павлова. Высокоглиноземистый шамот на основе техногенного сырья	268
Г. С. Гиренко, С. М. Яговитина, И. А. Павлова. Термостойкие керамические инфракрасные нагреватели на основе сырья Уральского региона.....	272

В. Н. Гушшамова, А. П. Хомяков, С. В. Морданов, Т. В. Хомякова, С. С. Пещура. Исследование потерь давления за счет трения по длине теплообменной трубки выпарного аппарата пленочного типа.....	276
К. Р. Кожевникова, М. Ф. Костерина, Ю. И. Нейн. Удаление асфальтосмолопарафиновых отложений	280
Е. И. Липина, В. А. Никулин. Структура потребностей предприятий России в выпарных установках	284
Н. Г. Михайлов, В. П. Ануфриев. Эколого-экономическая эффективность подогревателей топливного и пускового газа	288
Л. Ф. Муфтеева, Д. Д. Коньков, Ю. Д. Конькова, К. Г. Земляной, И. А. Павлова. Получение высокопористых ячеистых катализаторов для очистки выхлопных газов	292
А. В. Никулин, Ю. С. Мороз, Н. А. Третьякова. Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом	297
О. Б. Павленко, Ю. А. Устинова, А. В. Суздальцев, Ю. П. Зайков. Стабильность и электрохимическое поведение кремния в расплаве $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$	301
А. А. Першин, И. А. Гурин, Н. А. Спирин. Оценка распределения параметров комбинированного дутья по фурмам доменной печи	305
В. М. Разгуляева, О. Н. Леонидова. Электроперенос в двойном ванадате иттербия.....	310
М. А. Сапожникова, К. Г. Земляной. Получение легированного реактивного глинозема из природного или техногенного сырья	313
А. В. Тепикина, В. С. Костров, Н. О. Прохоренков, В. Н. Самойлов, С. Г. Власова. Стеклокристаллические композиты для создания энергоэффективных белых светодиодов.....	317
Р. Ф. Хажаихметова, Д. А. Мещерских, М. Ю. Углинских, С. Г. Власова. Отходы шлаковатного производства — в пеностекло	320
В. Э. Шварцкопф, Г. С. Гиренко, Е. П. Фарафонтова, И. А. Павлова. Утилизация побочных продуктов производства керамической плитки	324
В. Е. Яковлев, Ю. И. Нейн. Использование системы замкнутого водооборотного цикла в производстве дегидрирования пропана	327
 Раздел 3. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.	
Неуглеродная и малая энергетика	331
А. Н. Беззаботнова, Е. П. Аккузина, А. В. Поздин, Л. Н. Маскаева. Прогнозирование условий химического осаждения тонкопленочного буферного слоя ZnS для солнечных элементов для солнечных элементов	332

Р. Р. Галиев, С. В. Першина, С. Г. Власова. Влияние SiO_2 на термические свойства вольфрамфосфатных стекол	336
М. Ю. Галиева, С. В. Першина, С. Г. Власова. Влияние B_2O_3 на фазовый состав и электрические свойства стеклокерамики $\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{0,5}\text{Ge}_{1,5}(\text{PO}_4)_3$	340
Т. А. Гевел, С. И. Жук, А. Е. Вахромеева, А. В. Суздальцев, Ю. П. Зайков. Электроосаждение кремния из расплава $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$	344
Е. А. Зыков, А. И. Вальцева, Н. В. Вальцев. Геотермальная энергетика: история и перспективы развития	347
П. А. Каганер, С. Е. Щеклеин. Техничко-экономическое сравнение вариантов фотоэлектрических станций для средней полосы России.....	352
А. А. Казанцева, С. Е. Щеклеин. Солнечная электростанция для энергоснабжения дома	356
К. К. Климов, Е. Ф. Лизунова, Б. Э. Любомудров, М. А. Безматерных, М. В. Волкова. Очистка биогаза с помощью <i>Chlorella vulgaris</i>	360
Д. В. Лагунов, А. И. Попов. Производство воды из воздуха	364
Д. Н. Литвинов, В. С. Костарев, В. А. Климова, В. И. Велькин. Использование CFD-моделирования для анализа влияния инсоляции и ветровой нагрузки на эффективность работы солнечных коллекторов	368
В. Е. Малыгин, А. И. Попов. Выработка электрической энергии приливной ГЭС.....	372
А. В. Поздин, Л. Н. Маскаева, В. Ф. Марков. Тонкопленочные слои твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$: перспективные соединения для создания солнечных элементов	376
Р. Н. Рахматулин, Е. А. Скороплетов. Повышение энергоэффективности коммунальных систем путем внедрения установок на базе ВИЭ	380
А. А. Резиньков, С. Е. Щеклеин. Сравнительный анализ эффективности гибридных (солнечно-дизельных) электростанций для регионов России	385
В. В. Свистунов, И. Р. Хайретдинов, Н. М. Хомитов, В. И. Велькин. Реконструкция и пуск многолопастной ВЭУ после разрушения штормовым ветром	389
Е. М. Старовойтова, А. С. Колпаков. Комбинированная система теплоснабжения с использованием энергии солнца и земли	394
А. А. Степаненко, Ю. А. Дерябина, А. И. Вальцева. Разработка опытной модели турбины Френсиса для малой гидроэнергетики.....	398

Д. В. Трякин, А. Р. Кудрявцев, С. Э. Монгуш, П. С. Шуркалов. Зарядные станции для электромобилей на основе возобновляемых источников энергии.....	402
А. С. Чигак, С. К. Шерьязов. Исследование энергетических характеристик солнечных элементов	406
В. А. Эльтерман, А. В. Бороздин, П. Ю. Шевелин, Л. А. Елшина. Вязкость хлоралюминатной ионной жидкости 1-бутил-3-метилимидазолия хлорида.....	412
Раздел 4. Атомная энергетика. Ядерные энергетические установки: проектирование, эксплуатация, вывод из эксплуатации	417
Д. А. Агеев, Д. Н. Орлов, Т. Д. Торопов, М. А. Вольман, М. Н. Мечтаева. Повышение энергетической, экологической и экономической эффективности АЭС	418
Д. А. Агеев В. Ф. Степанов. Моделирование процессов сепарации влаги в парогенераторе ПГВ-1000М реакторной установки ВВЭР-1000	422
М. В. Аладаилах, И. А. Ширманов, Е. Д. Стругов, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков. Об использовании бетонов с добавлением барита для защиты от гамма-излучения.....	425
М. В. Аладаилах, И. А. Ширманов, Е. Д. Стругов, О. Л. Ташлыков. Влияние содержания Bi_2O_3 на механические и радиационно-защитные свойства стекла.....	429
А. М. Балдин, А. В. Куртеев, К. Е. Орлов, М. М. Севастьянов, О. Л. Ташлыков. Система мониторинга напряженно- деформированного состояния металлоконструкций АЭС.....	433
И. А. Бессонов, С. В. Чалпанов, О. Л. Ташлыков. Очистка натриевого теплоносителя первого контура реакторов на быстрых нейтронах от радионуклидов цезия.....	437
И. А. Бессонов, С. В. Чалпанов, О. Л. Ташлыков, В. А. Климова. Постановка задачи моделирования течения натрия через насыпной слой графита	441
А. В. Больших, В. В. Киргизов, А. И. Вальцева. Система контроля нейтронного потока АЭС	445
А. А. Гаврилова, Р. В. Ключев. Разработка системы поддержания температуры воды бассейнов выдержки на атомных электростанциях.....	449
С. М. Глухов, А. Д. Лёзов, В. Ю. Литовченко, О. Л. Ташлыков. Исследование влияния расположения различных материалов в слоистой защите на кратность ослабления гамма-излучения	453

Р. М. Исхужин, А. Д. Горбатов, А. И. Вальцева. Система внутриреакторного контроля Ленинградской АЭС	457
М. М. Козлова, В. Ф. Марков, Л. Н. Маскаева. Окисление катионита КУ-2×8 раствором пероксида водорода	462
В. С. Костарев, И. А. Ширманов, Д. Н. Литвинов, А. А. Аникин, С. Е. Щеклеин. Получение суперсверхкритических параметров пара на АЭС путем применения компрессии и неядерного перегрева пара	465
В. С. Костарев, И. А. Ширманов, Д. Н. Литвинов, С. Е. Щеклеин. О повышении эффективности использования ядерного топлива и безопасности АЭС типа ВВЭР путем применения неядерного перегрева пара	469
Е. А. Маралова, С. Е. Щеклеин. Современное состояние и перспективы развития атомной энергетики Китая	473
С. Р. Нуреева, Н. М. Макарова. Изучение радиофобии среди молодежи деревни Ситцева Нязепетровского района Челябинской области	478
Д. Н. Орлов, М. А. Вольман. Применение тренажеров при изучении процессов, протекающих в ядерных реакторах ВВЭР-1000	483
С. Н. Потеряев, И. А. Сивинских, И. Э. Розаненков, С. Е. Щеклеин. Повышение маневренности АЭС за счет криогенных технологий	486
И. А. Сивинских, С. Н. Потеряев, И. Э. Розаненков, О. Л. Ташлыков. 3D-моделирование технологических систем и процессов комплекса по переработке радиоактивных отходов	491
И. А. Сивинских, С. Н. Потеряев, И. Э. Розаненков, О. Л. Ташлыков. Конструкция перегрузочных устройств реакторов на быстрых нейтронах	495
Е. Д. Стругов, И. А. Ширманов, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков. Оценка экранирующих свойств природных минералов и отходов производства для использования в радиационной защите	500
Та Ван Тхыонг, Ха Хюи Мань, О. Л. Ташлыков. Развитие энергетики Вьетнама	504
Т. Д. Торопов, А. А. Беляков. Моделирование тепловых схем АЭС	510

Раздел 5. Чистые угольные технологии. Газификация.

Использование низкосортных топлив и ТКО	513
Д. С. Беляков, С. Н. Коровин, Д. А. Долинин. О влиянии температуры обжига на свойства модифицированной керамики	514

А. В. Верещагина, О. Н. Яковлева, Н. А. Третьякова. Мусоросжигание как альтернативный способ утилизации твёрдых коммунальных отходов	518
М. И. Ершов, М. А. Горский, В. Г. Тупоногов, Н. А. Абаимов. Исследование сеточной независимости при моделировании псевдооживленного слоя	523
У. В. Жижина, Я. О. Морозов, Ю. А. Каграманов, С. А. Грицук, В. Г. Тупоногов. Моделирование образования оксидов азота при работе газовой турбины на синтез-газе.....	528
А. В. Замятина, А. Д. Никитин, П. В. Осипов, Т. Ф. Богатова. Исследование влияния водяного пара на реакцию карбонизации оксида кальция.....	533
В. В. Крайнов, К. В. Суманева, Д. А. Долинин. Использование текстильных отходов в производстве модифицированной керамики	537
О. А. Кузнецов, А. Ю. Кисельников, Н. Н. Акифьева. Оценка показателей надежности реализации функции «технологическая защита» на базе ПТК «Сура»	541
А. К. Матюхина, Г. Е. Масленников, А. Ф. Рыжков. Основные методы карбонизации золовых отходов ТЭС	545
Ю. А. Мезенина, С. П. Настенко, А. И. Вальцева, Н. В. Вальцев. Лабораторный опыт проведения первичной биологической рекультивации	549
Я. О. Морозов, У. В. Жижина, Ю. А. Каграманов, С. А. Грицук, В. Г. Тупоногов. Моделирование гидродинамики процесса сухой теплой сероочистки синтез-газа в реакторе с циркуляционным кипящим слоем	555
В. В. Назарова, Г. Е. Масленников, А. Ф. Рыжков. Верификация термодинамического расчета установки ускоренной минеральной карбонизации	560
В. В. Назарова, А. Д. Никитин, А. Ф. Рыжков. Использование CO_2 из дымовых газов ТЭС при производстве соды.....	564
Д. С. Некрасов, Н. А. Абаимов. Валидация численной CFD-модели двухфазного псевдооживленного слоя сыпучего материала	569
Г. А. Нестерова, Н. А. Абаимов. Сравнение моделей турбулентности на примере поточного одноступенчатого газификатора	573
О. В. Седачёва, Н. А. Абаимов. Сравнение моделей турбулентности на примере поточного двухступенчатого газификатора	577

Н. А. Симанов, Г. Е. Масленников, А. Ф. Рыжков. Обзор экспериментальных исследований прямой карбонизации угольной золы	582
Н. А. Симанов, Г. Е. Масленников, А. Ф. Рыжков. Параметры и показатели процесса карбонизации угольной золы	586
И. Д. Суворин, П. В. Осипов, В. А. Микула. Анализ факторов, влияющих на эрозионный износ трубчатого воздухоподогревателя энергетического котла	591
Е. А. Ткаченко, Т. Ф. Богатова, М. Б. Чернова. Технология карбонизации отходов производств как способ секвестрации CO ₂	595
Е. А. Ткаченко, П. В. Осипов, Т. Ф. Богатова. Экспериментальное исследование процесса карбонизации оксида кальция на приборе ТГА	599
М. М. Чижикова, О. Б. Колибаба. Теплотехнология получения керамического материала на основе пиролизного остатка твердых коммунальных отходов	603
С. Э. Шавадзе, О. Б. Колибаба. Исследование теплофизических свойств твердых коммунальных отходов	607
К. С. Шанина, Е. В. Жбанова, Е. В. Гусев. Технологические особенности обжига керамических изделий, отощенных золой ТЭС.....	611
И. Б. Шестаков, Е. А. Ткаченко, Т. Ф. Богатова. Анализ факторов, влияющих на величину удельной поверхности и размер пор оксида кальция	615
И. Б. Шестаков, Т. Ф. Богатова, П. В. Осипов. Влияние условий термической обработки на характеристики оксида кальция	620
К. А. Щекотова, В. А. Микула. Особенности конструкции пластинчатого газо-газового теплообменного аппарата при высоких давлениях сред.....	624
О. Н. Яковлева, А. В. Верещагина, Н. А. Третьякова. Сравнение термических методов утилизации твердых коммунальных отходов.....	628

**Даниловские чтения — 2020.
Вместо предисловия...**

УДК 620.9-047.645

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ МЕЖДУНАРОДНОГО МОЛОДЕЖНОГО ДАНИЛОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФОРУМА — 2019

В. Ю. Балдин¹, Г. И. Никитина²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ v.u.baldin@urfu.ru

Аннотация. Представлены краткие итоги Международного молодежного Даниловского энергетического форума, проведенного в Уральском федеральном университете (Екатеринбург, 9–13 декабря 2019 г.). Изложены основные результаты студенческой олимпиады и научно-практической конференции, рассматривающих следующие темы: энерго- и ресурсосбережение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, атомная энергетика.

Ключевые слова: энергосбережение, ресурсосбережение, энергоэффективность, энергообеспечение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, атомная энергетика, учебно-научный конкурс, студенческая олимпиада, международная научная конференция

MAIN RESULTS OF THE INTERNATIONAL YOUTH DANILOV ENERGY FORUM — 2019

V. Yu. Baldin¹, G. I. Nikitina²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ v.u.baldin@urfu.ru

Abstract. Brief results of the International Youth Danilovsky Energy Forum held at Ural Federal University (Yekaterinburg, December 9–13, 2019) are presented. The main results of the student Olympiad and conferences “Energy and Resource Saving. Power supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear power” are presented.

Keywords: energy saving, resource saving, energy efficiency, power supply, non-traditional and renewable energy sources, nuclear power, educational and scientific competition, student Olympiad, international scientific conference

С 2000 г. в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ, ранее — УГТУ-УПИ) Уральский энергетический институт (УралЭНИИ) проводит учебно-научные молодежные конкурсные мероприятия по темам энерго- и ресурсосбережения, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, атомной энергетике — Всероссийскую студенческую олимпиаду с международным участием и Международную конференцию, в которых за это время приняли участие свыше 7,5 тысяч человек из нескольких десятков вузов России и зарубежья.

Тематика проводимых мероприятий соответствует утвержденным Президентом России приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) [1], а также перечню критических технологий Российской Федерации, который включает в себя:

- 1) создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии;
- 2) энергоэффективное производство и преобразование энергии на органическом топливе;
- 3) новые и возобновляемые источники энергии, включая водородную энергетику;
- 4) атомную энергетику, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.

Кроме того, рассматриваемые на упомянутых мероприятиях темы соответствуют приоритетам и перспективам научно-технологического развития Российской Федерации на ближайшие 10–15 лет (в соответствии с указом Президента России № 642 от 01.12.2016 [2]), включающим ряд направлений, которые позволят обеспечить:

- 1) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике;
- 2) повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья;
- 3) формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии.

Одной из основных задач для достижения сформулированных целей научно-технологического развития Российской Федерации является создание возможности для выявления талантливой молодежи

и построения успешной карьеры в области науки, технологий и инноваций, обеспечив тем самым развитие интеллектуального потенциала страны.

В 2019 г. традиционные олимпиада и конференция в очередной раз проходили в рамках Даниловских чтений, организуемых в память о профессоре Н. И. Данилове (1945–2015) — энтузиасте, ученом-практике в области энергосбережения, авторе учебников и популярных публикаций, основателе кафедры энергосбережения УрФУ и Института развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения (который вскоре после смерти ученого был назван его именем), почетном гражданине Свердловской области. Его не стало в августе 2015 г., но проекты, начатые им, продолжают жить и развиваться.

В рамках Международного молодежного Даниловского энергетического форума с 9 по 13 декабря 2019 г. проведены [3]:

1) заключительный этап Всероссийской студенческой олимпиады с международным участием по следующим дисциплинам: «Энерго- и ресурсосбережение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Атомная энергетика»;

2) Международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» — Даниловские чтения.

На олимпиаду и конференцию прибыли студенты, аспиранты и преподаватели из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Иванова, Кирова, Нижнего Новгорода, Челябинска, Ижевска, Магнитогорска — всего 56 человек. Вместе со студентами УралЭНИН УрФУ в олимпиаде участвовали более 120 будущих бакалавров и магистров.

По дисциплине «Энерго- и ресурсосбережение» в индивидуальном первенстве победителем олимпиады признана студентка Вятского государственного университета (ВятГУ, Киров) Е. А. Лыскова; призерами, занявшими II и III место, стали также студенты ВятГУ В. С. Рыбаков и Д. А. Ефремов соответственно.

В командных соревнованиях по этой дисциплине участвовали 9 команд студентов из 6 вузов: I место заняла команда студентов ВятГУ (Е. А. Лыскова, Д. А. Ефремов, В. С. Рыбаков); II место — у команды студентов УралЭНИН УрФУ (А. В. Маслов, Д. А. Суровцев, А. В. Ворончихин); III место присуждено команде студентов Нижегородского государственного архитектурно-строительного универ-

ситета (ННГАСУ, Нижний Новгород) (Т. В. Борисова, Е. С. Зайцева, К. С. Левончук).

По дисциплине «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» победителем стал студент УралЭНИН УрФУ И. Р. Хайретдинов; призерами, занявшими и поделившими II место стали студент УралЭНИН УрФУ В. Е. Малыгин и студент Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ, Челябинск) А. А. Чабаненко; III место заняли студенты из НИУ «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ», Москва) А. Р. Кудрявцев и Н. Э. Тобоева.

В командном первенстве по этой дисциплине участвовали 5 команд студентов из 4 вузов: победили студенты НИУ «МЭИ» (А. Р. Кудрявцев, Н. Э. Тобоева, Д. В. Трякин); II место заняли студенты УралЭНИН УрФУ (В. Е. Малыгин, И. Р. Хайретдинов, В. А. Пушкар); III место — у студентов ЮУрГАУ (А. А. Кулаков, Р. Н. Рахматулин, А. А. Чабаненко).

По дисциплине «Атомная энергетика» победителем олимпиады признан студент УралЭНИН УрФУ А. А. Аникин; призерами, занявшими II и III места, стали студенты Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ, Иваново) Н. П. Грименицкий и А. Д. Митин соответственно.

В командных соревнованиях по этой дисциплине участвовали 3 команды студентов из 3 вузов: на I месте студенты ИГЭУ (Н. П. Грименицкий, А. Д. Митин, Д. Н. Романов); на II месте студенты УралЭНИН УрФУ (А. А. Аникин, В. С. Костарев, Д. Ю. Третьяков); на III месте студент из НИЯУ «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ «МИФИ») А. Каргаполов (неполная команда).

Участники, занявшие призовые места на олимпиаде, получили грамоты Региональной энергетической комиссии Свердловской области, благодарность Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области, а также различные призы.

Тематические секции конференции, на которых заслушивались доклады участников, отражают актуальные научные направления, по которым ведутся исследования:

1) энергосбережение, в т. ч. повышение энергетической и экологической эффективности в отраслях, энергообеспечение и устойчивое развитие энергетики, контрольно-измерительные и регулирующие приборы, системы энерго- и ресурсообеспечения, образовательные

программы, средства и технологии в области энерго- и ресурсосбережения;

2) ресурсосбережение, в т. ч. технологии, материалы и оборудование для целей энерго- и ресурсосбережения, повышения энергетической и экологической эффективности;

3) нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, в т. ч. неуглеродная и малая энергетика;

4) ядерная энергетика, в т. ч. ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из нее;

5) чистые угольные технологии, газогенерация, использование низкосортных топлив и твердых коммунальных отходов (ТКО).

На пленарном заседании Даниловских чтений и на пяти тематических секциях конференции заслушано более 80 докладов 150 участников.

В 2019 г. на конференции было представлено в общей сложности более 210 докладов свыше 600 участников; сборник материалов, который опубликован в Электронном научном архиве УрФУ, содержит 878 страниц [4; 5].

Большинство статей, вошедших в сборник, размещено в научной электронной библиотеке eLibrary.ru [6] и учитывается в российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Помимо студентов УрФУ в конференции участвовали молодые ученые из других стран, студенты и аспиранты ряда российских вузов, а также представители учебных заведений Екатеринбурга, в т. ч. Уральского государственного аграрного университета (УрГАУ), Уральского государственного горного университета (УГГУ), Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС) и институтов Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН).

Многие участники награждены за лучшие работы, представленные на этом научном форуме, дипломами Министерства промышленности и науки Свердловской области, дипломами и призами Администрации города Екатеринбурга, грамотами и призами Института развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения имени Н. И. Данилова, призами от компании «ВИЛО РУС».

Информация о проведенных мероприятиях представлена на сайтах УрФУ [3; 7; 8], Института развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения [9], эксперт-бюро «ЭнергияВита» [10] и других интернет-ресурсах.

Список источников

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации [Электронный ресурс] : указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514> (дата обращения: 25.11.2020).

2. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс] : указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 25.11.2020).

3. Международный молодежный Даниловский энергетический форум [Электронный ресурс] // УрФУ. URL: <http://urfu.ru/ru/students/study/olympic/energy/2019/> (дата обращения: 25.11.2020).

4. Содержание [Электронный ресурс] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2019. С. 866–876. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/88221> (дата обращения: 25.11.2020).

5. Contents [Electronic resource] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2019. С. 877–886. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/88222> (дата обращения: 25.11.2020).

6. Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика [Электронный ресурс] : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2019. 887 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43800184> (дата обращения: 25.11.2020).

7. Российские студенты обсуждают в вузе ключевые тренды современной энергетики [Электронный ресурс] // УрФУ. URL: <https://urfu.ru/ru/news/30059/> (дата обращения: 25.11.2020).

8. В университете подвели итоги олимпиады для студентов-энергетиков [Электронный ресурс] // УрФУ. URL: <https://urfu.ru/ru/news/30134/> (дата обращения: 25.11.2020).

9. Сегодня нам исполняется 15 лет! [Электронный ресурс] // ИнЭС. URL: <http://ines-ur.ru/segodnya-nam-ispolnyaetsya-15-let/> (дата обращения: 25.11.2020).

10. Сборник «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» (Даниловские чтения в УрФУ), 2019 [Электронный ресурс] // ЭнергияВита. URL: <https://energiavita.ru/2020/09/15/сборник-энерго-и-ресурсосбережение/> (дата обращения: 25.11.2020).

УДК 620.9-049.35106

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ: РЕАЛИЗАЦИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В. И. Фадеев

Институт развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения
имени Н. И. Данилова, Екатеринбург, Россия

v.fadeev@egov66.ru

Аннотация. Показана роль Н. И. Данилова в создании научно-методической школы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» в Уральском регионе и дальнейшем развитии этого направления в развитии экономики региона и страны. Представлены основные направления и результаты работы Института развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения имени Н. И. Данилова по экспертной, аналитической поддержке отраслевых решений, принимаемых в Свердловской области и направленных на выполнение комплексного плана мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики Российской Федерации и государственной программы Свердловской области «Развитие жилищно-коммунального хозяйства и повышение энергетической эффективности в Свердловской области до 2024 года».

Ключевые слова: энергосбережение, повышение энергетической эффективности, ресурсосбережение, развитие жилищно-коммунального хозяйства, Свердловская область, коммунальная инфраструктура, топливно-энергетический баланс, энергетические обследования, энергетический менеджмент, сети энергоснабжения

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT: SALES IN THE SVERDLOVSK REGION

V. I. Fadeev

Institute for the Development of Housing and Communal Services
and Energy Saving named after N. I. Danilov, Ekaterinburg, Russia

v.fadeev@egov66.ru

Abstract. The role of N. I. Danilov in the creation of a scientific and methodological school “Energy conservation and energy efficiency” in the Ural region and the further development of this direction in the development of the economy of the region and the country. The main directions and results of the work of the Institute for the Development of Housing and Utilities and Energy Saving named after N. I. Danilov on expert, analytical support of industry decisions made in the Sverdlovsk region and aimed at the implementation of the comprehensive plan of measures to improve the energy efficiency of the Russian economy and the state program of the Sverdlovsk region “Development of housing and utilities economy and energy efficiency improvement in the Sverdlovsk region until 2024”.

Keywords: energy saving, increasing energy efficiency, resource saving, development of housing and communal services, Sverdlovsk region, communal infrastructure, fuel and energy balance, energy surveys, energy management, power supply network

Даниловский энергетический форум уже несколько лет объединяет на своей площадке людей, связавших свою профессию и научную деятельность с энергетикой.

Институт развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения, который представляет автор настоящей работы, носит имя Н. И. Данилова — основателя организации, созданной в 2006 г. Благодаря ученому Свердловская область стала первопроходцем в сфере энергосбережения, выстроив работу еще до утверждения на федеральном уровне базового документа — федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Важно отметить, что Н. И. Данилов не только создал научно-методическую школу «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» в Уральском регионе, но и впервые вынес вопросы энергосбережения на государственный уровень. Тем самым ученый привел в действие принципы и подходы, разработанные вместе с коллегами в рамках научной деятельности. Созданное Даниловым направление развития экономики Свердловской области сегодня объединяет широкое профессиональное сообщество.

Институт развития жилищно-коммунального хозяйства и энергосбережения имени Н. И. Данилова (Институт энергосбережения) [1] реализует на практике то, что студенты изучают в сфере энергосбережения и топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Учредителем Института энергосбережения является Министерство энергетики и ЖКХ Свердловской области. Во многом задача организации состоит в экспертной, аналитической поддержке отраслевых решений, принимаемых в регионе: он готовит аналитику в сфере энергосбережения и развития коммунальной инфраструктуры, дает свои предложения с обоснованием экспертной позиции в Минэнерго региона, в результате чего утверждаются стратегические документы развития и программы, реализуются инвестиционные проекты, принимаются необходимые правовые акты.

Направление работы Института энергосбережения не ограничивается энергосбережением и повышением энергоэффективности. Учреждение также ведет вопросы в сфере жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), выполняет техническое обследование и разработку схем развития коммунальной инфраструктуры, разрабатывает программы комплексного развития муниципальных образований. При этом в рамках своей деятельности институт располагает широким спектром инструментов:

- 1) ведет аналитику по капитальному ремонту зданий бюджетной сферы, источникам освещения, формирует доклад о состоянии энергосбережения в Свердловской области;

- 1) разрабатывает топливно-энергетический баланс региона и муниципалитетов;

- 2) проводит энергетические обследования;

- 3) ведет образовательную деятельность, в т. ч. по программам повышения квалификации по энергосбережению для работников органов власти и организаций бюджетной сферы;

- 4) составляет прогноз кадрового обеспечения сферы ЖКХ в регионе.

Всю деятельность Института энергосбережения условно можно разделить на две части. Первая — это стратегическое планирование и разработка программ в сфере развития коммунальной инфраструктуры (с органами местного самоуправления). С ней неразрывно связаны мероприятия по энергоэффективности. Это переход на более эффективный вид топлива для источников теплоснабжения, а также планирование мероприятий по модернизации сетей тепло-, водо-, газоснабжения. Все это в целом направлено на повышение эффективности потребления ресурсов на территории муниципалитета. Вторая часть — это работа с потребителями: сбор исходных данных по потре-

бителям на территории муниципалитетов по видам ресурсов, работа с бюджетными учреждениями в части повышения энергоэффективности, проведение энергообследований.

Ключевые задачи стратегического планирования и взаимодействия с потребителями Институт энергосбережения выполняет с применением цифровых технологий, которые сегодня затрагивают все важные сферы деятельности. Сферы энергосбережения и развития коммунальной инфраструктуры, безусловно, входят в их число.

Если приводить конкретные примеры, то в Свердловской области есть две информационные системы: региональная информационно-аналитическая система «Матрица РесурсСбережения» (РИАС «МАРС») [2] и региональный портал по технологическому присоединению [3].

РИАС «МАРС» служит для реализации полномочий государственных и муниципальных органов власти. Система дает доступ к информации о муниципальной инфраструктуре, диспетчеризации, позволяет выполнять согласование лимитов на топливно-энергетические ресурсы. В рассматриваемой системе хранятся архивы схем тепло- и водоснабжения, программ комплексного развития муниципальной инфраструктуры, а также осуществляется централизованный доступ к электронным моделям и реестру инфраструктурных мероприятий.

Региональный портал по технологическому присоединению направлен на деятельность ресурсоснабжающих организаций (РСО). Он позволяет в электронном виде подавать и отслеживать рассмотрение заявки на техприсоединение к сетям, согласовывать и получать разрешительную документацию, вести согласование инвестиционных программ [2].

Две информационные системы интегрированы друг в друга на стыке полномочий по согласованию инвестиционных программ со схемами и программами развития инфраструктуры муниципального уровня. Функционал систем направлен на повышение эффективности и прозрачности межведомственного взаимодействия, что невероятно важно в условиях стремительно развивающихся технологий, организаций и рынка в целом.

Рассматривая цифровые технологии в сфере ЖКХ и энергоснабжения, также стоит упомянуть такой прекрасный инструмент, как электронные модели тепло-, водо- и газоснабжения. Такие модели явля-

ются цифровым двойником систем коммунальной инфраструктуры конкретной территории. Инструмент предназначен для имитационного моделирования всех процессов, протекающих в системах ресурсоснабжения с детализацией от источника до потребителя. Электронная модель существенно повышает качество стратегического планирования развития инфраструктуры. С помощью рассматриваемого инструмента создается единая гибкая система координат между администрацией, РСО и потребителем, основанная на технических расчетах, например планы по снижению потерь в сетях.

В Свердловской области разработана электронная модель генеральной схемы газоснабжения и газификации на период до 2035 г., а также 43 электронные модели схем теплоснабжения муниципальных образований и 21 электронная модель схем водоснабжения.

Возвращаясь к теме энергосбережения, необходимо уделить внимание сегодняшним трендам, обозначенным на федеральном уровне и отмеченным в комплексном плане мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики РФ, утвержденном распоряжением Правительства РФ № 703-р от 19.04.2018. План предусматривает реализацию мероприятий, обеспечивающих повышение энергетической эффективности экономики страны, в отношении предприятий промышленности, регулируемых организаций, организаций с государственным участием, организаций бюджетной сферы, многоквартирных домов. При этом в отношении регулируемых инфраструктурных организаций планом предусмотрена реализация мероприятий по снижению потерь энергетических ресурсов как при их потреблении, так и в ходе транспортировки.

В концентрированном виде мероприятия плана направлены:

- 1) на обеспечение модернизации основных фондов;
- 2) увеличение вклада технологического фактора в снижение энергоемкости валового внутреннего продукта не менее чем до 1,5 % в год;
- 3) обеспечение сокращения технологического отставания России от ведущих стран.

Для выполнения поставленных задач предусмотрено:

- 1) развитие финансовых инструментов, таких как концессионное соглашение, энергосервисный контракт, а также тиражирование успешных практик их применения;
- 2) создание системы моделирования состояния энергоэффективности российской экономики в реальном времени и на перспек-

тивую, а также банков данных энергоэффективных технологий, планируемых и проводимых разработок и исследований наилучших достижений в области энергосбережения и повышения энергоэффективности;

3) привлечение «зеленых инвестиций» российских и международных финансовых организаций для реализации проектов, направленных на повышение энергетической эффективности на территории России;

4) доведение потерь энергоресурсов до нормативного уровня;

5) повышение энергоэффективности проектируемых зданий массовой застройки, в т. ч. многоквартирных домов;

6) обеспечение повышения энергоэффективности внутридомовых инженерных систем и снижение расходов потребителей на оплату коммунальных услуг;

7) проработка и введение механизмов налогового стимулирования энергоэффективности, а также стимулирования промышленных предприятий к реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности;

8) популяризация мероприятий в области энергосбережения и повышения энергоэффективности, стимулирование потребителей к переходу на современные осветительные приборы.

Одной из задач Института энергосбережения является координация и стимулирование бюджетных организаций Свердловской области к энергосбережению и повышению энергетической эффективности. При этом бюджетные организации имеют совершенно разную специфику (учреждения здравоохранения, детские дошкольные учреждения, учебные заведения, учреждения культуры и искусства, физкультуры и спорта, административные и пр.).

Особую актуальность для бюджетных учреждений приобретает энергоменеджмент — управление и оптимизация затрат на энергоносители. Федеральный закон № 261-ФЗ обязывает организации с участием муниципального образования утверждать и реализовывать программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Опыт показывает, что многие бюджетные организации могут значительно снизить свои энергозатраты на 10–15 % без потерь в уровне комфорта путем организации системы энергоменеджмента по примеру передовых коммерческих компаний России и мира, успешно внедряющих такую систему.

Для внедрения принципов энергоменеджмента в бюджетных учреждениях Свердловской области используется следующая методология:

- 1) разработка программы энергосбережения в каждом бюджетном учреждении Свердловской области;
- 2) организация финансового учета экономического эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий и рефинансирование части экономии в рамках новых энергосберегающих мероприятий в профильных министерствах и ведомствах;
- 3) назначение ответственных лиц за энергосбережение в каждом бюджетном учреждении;
- 4) постоянное обучение персонала и лиц, ответственных за энергосбережение;
- 5) популяризация энергосберегающего образа жизни.

Для успешной реализации программ энергосбережения рекомендуется предварительно сформировать систему обязательных ключевых показателей энергоэффективности с учетом анализа результатов предыдущего периода. Реализовать это условие возможно благодаря действующей системе предоставления энергетических деклараций. Большое значение имеет работа по лимитированию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для организаций, финансируемых из областного и муниципальных бюджетов. Внедрение этого механизма не только значительно облегчает работу в настоящее время, но и закладывает фундамент для энергетического планирования.

Также действенным инструментом повышения энергоэффективности является капитальный ремонт. Организациям бюджетной сферы в Свердловской области рекомендовано руководствоваться минимальным перечнем работ, обеспечивающих повышение энергоэффективности зданий бюджетного сектора, и порядком их реализации, утвержденным постановлением Правительства Свердловской области № 926 ПП от 20.12.2018 «Об утверждении минимального перечня работ по капитальному ремонту объектов бюджетной сферы Свердловской области, обеспечивающих повышение энергетической эффективности, и порядка его реализации».

Институт энергосбережения на постоянной основе ведет мониторинг капремонта объектов бюджетной сферы. Итоги 2019 г. показали, что к наиболее распространенным видам работ относятся:

- 1) ремонт кровли и чердачных помещений — теплопотери через крышу, могут достигать 10–20 % от общего теплопотребления здания;

2) установка окон с высоким уровнем тепловой защиты и герметичности — как правило, сокращает около 10–15 % теплопотребления;

3) замена светильников на современные энергосберегающие источники света со светоотдачей не менее 95 лм/Вт. Согласно статистике, работы по модернизации освещения обеспечивают самый весомый экономический эффект.

Всего затраты на работы из рекомендованного перечня составляют в среднем 40 % от общих затрат на капитальные ремонты учреждений.

В завершение необходимо отметить, что, как показывает опыт, в вопросах энергосбережения решающую роль играют кадры — люди, которые руководят, координируют и выполняют работу. Только высокий профессионализм, активная позиция и целеустремленность позволят реализовать самые амбициозные планы и прорывные проекты, вовлечь в работу равнодушных людей и в команде единомышленников повышать эффективность использования энергоресурсов.

Несомненно, Международный молодежный Даниловский энергетический форум вносит важный вклад в решение этих вопросов, являясь полезной, интересной и продуктивной площадкой для обсуждения путей развития энергосбережения и повышения энергетической эффективности в регионе, в стране и на международном уровне.

Список источников

1. Институт энергосбережения [Электронный ресурс]. URL: <http://ines-ur.ru/> (дата обращения: 11.12.2020).

2. Региональная информационно-аналитическая система «Матрица РесурсоСбережения» [Электронный ресурс]. URL: <http://mars.ines-ur.ru/SystemSuccess> (дата обращения: 11.12.2020).

3. Региональный портал по технологическому присоединению в Свердловской области [Электронный ресурс]. URL: <http://seti.midural.ru/> (дата обращения: 11.12.2020).

Раздел 1
Энергосбережение
и повышение энергетической
эффективности.
Энергообеспечение

УДК 66.045.1

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ НАГРЕВА CO₂

А. Е. Алексеев¹, П. Ю. Худяков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ artyom97evg@gmail.com

Аннотация. В ходе работы была построена 3D-модель теплообменного аппарата. Произведен теплофизический расчет. Смоделирован поток CO₂ в трубе. Выполнен подбор перспективных материалов для изготовления конструкции. Подобраны методы снижения температуры стенки.

Ключевые слова: керамический теплообменник, CO₂, высокая температура, температура стенки

DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE HEAT EXCHANGER FOR CO₂ HEATING

A. E. Alekseev¹, P. Yu. Khudyakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the first
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ artyom97evg@gmail.com

Abstract. During the work, a 3D-model of the heat exchanger was built. Thermophysical calculation was made. Simulated CO₂ flow in a tube. Selection of advanced materials for making the structure is made. Methods of wall temperature reduction are selected.

Keywords: ceramic heat exchanger, CO₂, high temperature, wall temperature

В нагревателе в качестве рабочего тела используется углекислый газ; в качестве нагревателя выступают дымовые газы, поступающие после сжигания метана в горелочных устройствах. Температура, рабочее давление, расход сред приведены в таблице.

На основании указанных параметров в программе HTRI Xchanger Suite 8.1 просчитана теплофизика процесса. Теплообменник разбит на три части, в каждую из которых в равных частях поступает поток углекислого газа.

Такой прием был выбран для снижения перепада давления по трубной стороне и для более быстрого снижения температуры по ходу движения дымовых газов. По результатам расчета температура дымовых газов после первой части составила 1002,7 °С, после второй — 787,5 °С, после третьей — 562,6 °С. Количество труб — 1464 шт. Длина эффективной части — 1400 мм. Диаметр трубы — 20 мм, толщина — 2 мм. Поверхность теплообмена — 107 м². Коэффициент теплопередачи первой части — 141,3 Вт/(м² · К), второй — 128,3 Вт/(м² · К), третьей — 132,9 Вт/(м² · К).

Таблица

Исходные данные для расчета

Параметр	Единица измерения	Углекислый газ	Дымовые газы
Расход	кг/с	12,578	2,904
Температура на входе	°С	478,000	1211,000
Температура на выходе	°С	642,000	562,600
Рабочее давление	бар	64,610	1,075

В программе ANSYS Fluid было смоделировано течение CO₂ в теплообменной трубе первого хода первой части подогревателя рабочего тела. Контур скоростей приведен на рис. 1.

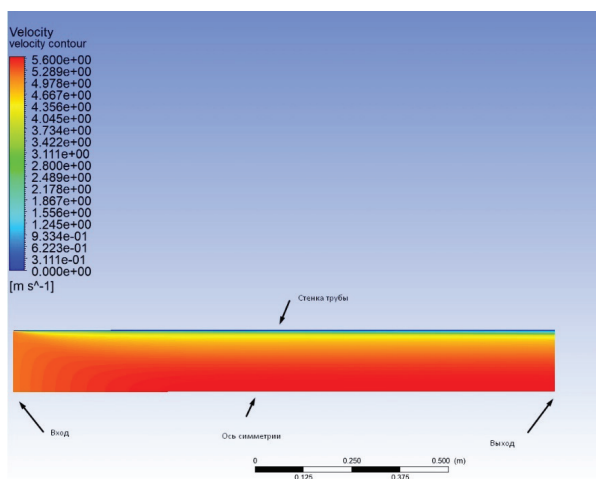


Рис. 1. Контур скоростей CO₂

Поскольку условия равны, рассматривалась половина диаметра трубы. На входе температура потока — $478\text{ }^{\circ}\text{C}$, на выходе — $553\text{ }^{\circ}\text{C}$. С ростом температуры и, как следствие, изменением теплофизических условий на выходе наблюдается рост скорости. Для визуализации и последующих расчетов в программах, способных рассчитать теплообменный аппарат на прочность методом конечных элементов (МКЭ), была построена 3D-модель в программе Autodesk Inventor. Эскиз приведен на рис. 2.

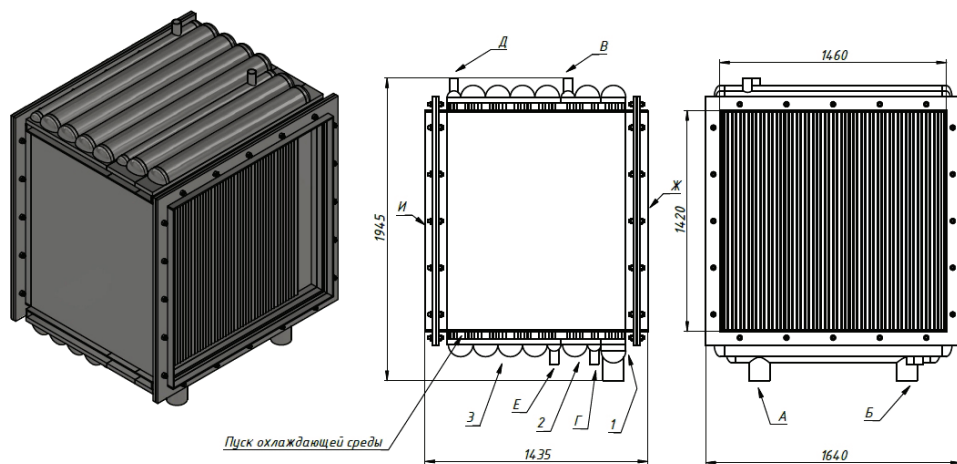


Рис. 2. Эскиз теплообменника

На приведенном рисунке видно, что углекислый газ поступает в патрубки *А*, *В*, *Д* и выходит через штуцера *Б*, *Г*, *Е* соответственно. Дымовые газы входят со стороны *Ж* и выходят со стороны *И*. Выбор геометрии поворотной камеры в виде полутрубы обусловлен восприятием больших нагрузок, в отличие от плоской стенки.

На рис. 3 приведена шахматная разбивка пучка с размерами продольного и поперечного шага (*Б*), а также изображены ребра, которые устраняют байпас (*А*).

В качестве уплотнителя используется терморасширенный графит (ТРГ). Материал теплообменных труб — керамика с добавлением цинка. В статье “Ceramic Heat Pipes for High Temperature Application” показано, что такие трубы могут выдерживать температуру до $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и являются сравнительно дешевыми [1]. Также отмечено, что в ходе эксперимента трубы показали удовлетворительные механические

свойства. В статье «Применение керамических труб в горизонтальной печи до 1600 °С» подтверждается возможность использования таких труб [2].

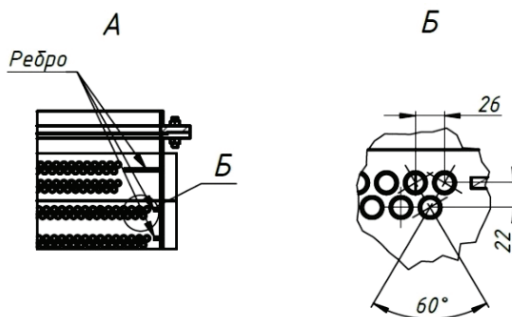


Рис. 3. Схема разбивки пучка:

A — ребра, *B* — шахматная разбивка пучка

Если же керамические трубы будут разрушаться под действием высокой температуры и давления, возможно применение сплавов из тантала (рабочая температура до 1500 °С) [3], ниобия (рабочая температура до 1300 °С) [4] либо из стали марки 10ХН45 Ю (температура применения до 1300 °С) [5].

Для снижения температуры корпуса внутренняя его часть по тракту дымовых газов покрыта футеровкой. В статье “FEM simulation of the thermomechanical behaviour of the refractory lining of a blast furnace” исследуется влияние футеровки на металлическую стенку. В результате расчета МКЭ авторы заметили, что температурное расширение происходит в основном в футеровке, и металл подвержен меньшим напряжениям [6].

В пространство, указанное на рис. 2, может подаваться среда для дополнительного теплосъема и охлаждения стенки, к примеру воздух, подаваемый на горение, либо для значительного снижения температуры можно использовать фреон. Для предотвращения охлаждения CO₂ в трубках необходимо их футеровать.

Список источников

1. Hack N., Unz S., Beckmann M. Ceramic Heat Pipes for High Temperature Application [Electronic resource] // Energy Procedia. 2017. Vol. 120. P. 140–148. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.147 (date of access: 15.11.2020).

2. Шевелев Ю., Малышев Ю. Применение керамических труб в горизонтальной печи до 1600 °С // Оборудование. 2007. № 3. С. 32–35.
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
4. Тугоплавкие материалы в машиностроении / под ред. А. Т. Туманова, К. И. Портного. М. : Машиностроение, 1967. 392 с.
5. ГОСТ 5632–2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные : введ. 2015–01–01. М. : Стандартинформ, 2016. 48 с.
6. Gruber D., Andreev K., Harmuth H. FEM simulation of the thermo-mechanical behaviour of the refractory lining of a blast furnace [Electronic resource] // Journ. of Mater. Proces. Techn. 2004. Vol. 155–156. P. 1539–1543. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.249 (date of access: 15.11.2020).

УДК 66.047.38:662.994

АНАЛИЗ ТЕПЛОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ ОБЖИГА ОГНЕУПОРОВ И СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

А. А. Баскакова¹, Е. Г. Нешпоренко²

^{1,2} Магнитогорский государственный технический университет
имени Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

¹ baskakova_1999@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена комбинированная работа обжиговых печей для кирпича и сушильных камер для древесины. В ходе работы предложено использование дымовых газов обжиговых печей в качестве теплового агента в сушильных камерах с целью снижения расхода топлива.

Ключевые слова: обжиговая печь, сушильная камера, дымовые газы, топливо

ANALYSIS OF THE COMBINED HEAT SCHEME FOR FIRING REFRACTORIES AND DRYING WOOD

A. A. Baskakova¹, E. G. Neshporenko²

^{1,2} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ baskakova_1999@mail.ru

Abstract. The topic of combined operation of brick kilns and wood drying chambers is considered. In the course of the work, it was proposed to use the smoke gases of kilns as a heat agent in drying chambers, in order to reduce fuel consumption.

Keywords: kiln, drying chamber, smoke gases, fuel

Для современного мира энергетика является базовой отраслью экономики, которая, в свою очередь, создает перспективы для применения новых технологий, разработки инновационных решений. Основным потребителем сырья и различных видов топлива, таких как природный газ, нефтепродукты и уголь, также является энергетика. В связи с тем, что полезные ископаемые относятся к невозобновля-

емым ресурсам, их нужно рационально использовать, максимально сокращая расход, учитывая технико-экономические показатели производства.

В настоящем исследовании рассматривается совместная работа обжиговых печей для кирпича и сушильной камеры для древесины. Проанализировав процессы обжиговых печей, сделано предположение, что возможный вариант использования дымовых газов печи в дальнейшем как теплоносителя для нагрева воздуха в сушильных камерах может понизить общий расход топлива на два производственных процесса и повысить энергоэффективность системы. Комбинированная работа двух агрегатов способна снизить потери теплоты в окружающую среду, что, в свою очередь, также является актуальной проблемой современного мира.

Проведенные исследования печей для обжига кирпича позволяют сделать вывод о том, что для тоннельной печи расход топлива, которым является природный газ, в идеальном случае составляет $53\text{--}150 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{т})$ при конечной температуре дымовых газов 150°C в зависимости от производительности печи. Часто подобные обжиговые печи не используют температурно-тепловой потенциал (температура дымовых газов на выходе примерно равна $600\text{--}800^\circ\text{C}$), выбрасывая его в окружающую среду. По этой причине задача энергоэффективного применения теплоты отходящих газов является актуальной. Одним из направлений такого использования может стать энергоемкий процесс сушки материалов.

Сушка древесины требует большого количества тепла в виде воздуха с температурой около 80°C [1]. Для интенсивной и качественной просушки требуется расход топлива, равный $230 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ [2].

В реальном производстве при выходе дымовых газов с высокой температурой, расход топлива увеличивается до $1400\text{--}1500 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{т})$. В таком случае общее потребление природного газа, учитывая некомплексированное производство, увеличивается до $1630\text{--}1730 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Утилизировать теплоту можно, подогревая воздух, воду или используя ее на собственные нужды. Мы рассматриваем использование теплоты как теплового агента для сушильных камер. При этом дымовые газы можно использовать как теплоноситель для нагрева воздуха или же для производства пара, который в дальнейшем будет циркулировать в «сушилке».

В настоящей работе предлагается использовать теплоту дымовых газов для нагрева воздуха в сушильной камере. Расчеты показали, что

количество нагретого воздуха позволит высушить до 14 м³ древесины, не затрачивая на ее просушку дополнительного топлива. Расчетные данные приведены в таблице.

Таблица

Сравнительные характеристики вариантов тепловых схем

Вид производства	Обжиг кирпича		Сушка древесины		Сумма тепловых схем
	Кол-во, т	Расход топлива, м ³ /ч	Кол-во, м ³	Расход топлива, м ³ /ч	Расход топлива
Раздельное производство	1	53	14	3205	3258
Комбинированное производство	1	1409	14	0	1409

Учитывая, что при комбинированной работе на сушку древесины дополнительное топливо затрачивать нет необходимости, т. к. теплота дымовых газов способна обеспечить пригодные условия для работы камеры, мы получаем на выходе два готовых продукта, используя топливо только на обжиг в количестве 1409 м³/ч.

Таким образом, можно сделать вывод, что утилизация теплоты обжиговых печей в сушильных камерах существенно снижает расход топлива в комбинированной системе производства целевых продуктов.

Список источников

1. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М. : Лес. пром-сть, 1987. 328 с.
2. Акишенков С. И., Корнеев В. И. Проектирование лесосушильных камер и цехов. 3-е изд. СПб. : ЛТА, 1992. 82 с.

УДК 669.162.263

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. С. Блинков¹, Н. А. Спирин², И. А. Гурин³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ sa5ha.blinkov@yandex.ru

Аннотация. Существующие методы аналитического расчета тепловых потерь, имеющие место при выплавке чугуна в доменных печах, не отражают реальный процесс плавки. Установлено, что анализ теплового баланса нижней ступени теплообмена позволяет определять тепловые потери в этой зоне печи.

Ключевые слова: доменный процесс, зональный тепловой баланс, потери тепла, энергоэффективность

ESTIMATION OF HEAT LOSSES IN THE LOWER STAGE OF THE BLAST FURNACE

A. S. Blinkov¹, N. A. Spirin², I. A. Gurin³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ sa5ha.blinkov@yandex.ru

Abstract. It is shown that the existing methods of analytical calculation of heat losses occurring during the smelting of pig iron in blast furnaces do not reflect the actual smelting process. It has been established that the analysis of the heat balance of the lower stage of heat exchange makes it possible to determine the heat losses in this zone of the blast furnace.

Keywords: blast furnace process, zonal heat balance, heat losses, energy efficiency

Наряду с задачами контроля расхода и качества железорудных материалов и кокса, технологии обработки жидких продуктов плавки (чугуна и шлака) контроль тепловых потерь в ходе доменной плавки является третьей по важности задачей в области средств контроля и автоматизации доменного процесса [1–3].

Нижняя ступень теплообмена доменной печи является основной при определении качественных и количественных параметров доменного процесса. В работах, посвященных доменной плавке, показано, что основная часть потерь тепла, отводимых системой охлаждения, приходится на высокотемпературную зону печи: нижнюю часть шахты, заплечики, фурменную зону, горн и лещадь [4; 5]. Их доля составляет 85–90 % от общих потерь тепла. Величина потерь тепла определяется конкретными конструктивными размерами печи, конструкцией системы охлаждения, состоянием кладки и режимными параметрами работы печи.

В процессе эксплуатации доменной печи тепловые потери меняются. Это происходит вследствие разгара кладки, образования гарнисажа и его возможного разрушения, развития периферийного либо, напротив, осевого газового потока и др. Анализ показал, что существующие методы аналитического расчета тепловых потерь в доменных печах, не отражают процесс плавки в реальных условиях работы доменной печи [1; 2].

Расчет потерь тепла по тепловому балансу в нижней ступени теплообмена позволяет оценивать их значение по текущей информации о работе печи. В этом случае учитываются конструктивные размеры и режимные параметры печи, характеристики комбинированного дутья, состав и свойства загружаемых железорудных материалов и кокса [6].

С помощью балансовой модели доменной печи Уральского федерального университета и Магнитогорского металлургического комбината (УрФУ–ММК) [7; 8] выполнен расчет тепловых балансов нижней ступени теплообмена доменной печи № 10 ММК в различные периоды работы. Некоторые исходные данные и результаты расчетов, представленные в табл. 1, 2, показывают, что тепловые потери для различных периодов работы печи изменяются от 3,0 до 7,3 %.

Таблица 1

Тепловые балансы нижней ступени теплообмена доменной печи № 10 ММК

Приход тепла		Расход тепла		
Статьи прихода теплоты	Варианты расчета			Варианты расчета
	1	2	3	
Теплота горения кокса у фурм, кДж/кг	2699,4	2615,6	2464,5	1004,7
Теплота, вносимая дутьем, кДж/кг	1669,6	1572,3	1434,2	214,6
Теплота конверсии газа, кДж/кг	157,9	210,9	210,9	168,7
Теплота, вносимая шихтой, кДж/кг	1667,0	1670,4	1649,1	1940,7
				2283,6
				179,1
				5791,4
				402,5
				6,5
Итого приход теплоты, кДж/кг	6193,9	6069,2	5758,7	7,3
				3,0

Таблица 2

Некоторые исходные данные и расчетные параметры для расчета теплового баланса

Параметр	Варианты расчетов		
	1 (апрель 2018 г.)	2 (июнь 2019 г.)	3 (август 2019 г.)
Производительность печи, т/сут.	4887,000	5020,000	4910,000
Доля окатышей в ЖРМ, %	38,700	36,600	33,400
Расход дутья, м ³ /мин	3717,000	4583,000	4250,000
Температура дутья, °С	1115,000	1003,000	997,000
Содержание кислорода в дутье, %	27,740	27,480	28,100
Содержание кремния в чугуна, %	0,696	0,672	0,686
Расход скипового кокса, кг/т чугуна	432,500	431,200	415,600
Расход кокса фр. 25–40 мм, кг/т чугуна	4,500	15,700	12,600
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	95,300	127,300	127,300
Расчетные параметры			
Удельный расход дутья, м ³ /т чугуна	1045	1108	1014
Теоретическая температура горения, °С	2066	1926	1867

Таким образом, выполнен расчет тепловых потерь в нижней части доменной печи. Контроль за тепловыми потерями необходим для оценки состояния огнеупорной кладки доменной печи, рационального газораспределения, а также для корректировки расхода кокса.

Список источников

1. Рамм А. Н. Современный доменный процесс: влияние различных факторов на результаты доменной плавки. М. : Metallurgy, 1980. 303 с.
2. Готлиб А. Д. Доменный процесс. М. : Metallurgy, 1966. 503 с.
3. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Днепропетровск : Пороги, 2009. 764 с.
4. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин [и др.] ; предисл. В. И. Большакова, Ю. Г. Ярошенко. Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. техн. ун-та, 2006. 542 с.
5. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев : Наукова думка, 2007. 411 с.
6. Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев [и др.]. М. : Metallurgy, 1978. 248 с.
7. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н. А. Спирин [и др.] ; под ред. Н. А. Спирина. Екатеринбург : [УрФУ], 2014. 558 с.
8. О возможности использования теплового баланса доменной плавки для контроля тепловых потерь / О. П. Онорин [и др.] // Металлург. 2018. № 3. С. 30–34.

УДК 621.438

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**С. В. Богданец¹, В. Л. Блинов², А. И. Плотников³, А. Д. Куракин⁴,
А. А. Лебедев⁵, Е. Е. Пясецкий⁶, К. А. Зотов⁷**

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

^{3,4} Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

^{5,6,7} Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² v.l.blinov@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрено понятие цифрового двойника технического устройства и видение настоящего вопроса различными компаниями. Проанализированы особенности применения цифровых двойников газотурбинных установок. Сформулированы основные цели и задачи, которые должен решать цифровой двойник газотурбинной установки на этапе эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинная установка, цифровой двойник, эффективность и надежность

APPLICATION OF INDUSTRIAL GAS TURBINE DIGITAL TWIN

**S. V. Bogdanec¹, V. L. Blinov², A. I. Plotnikov³, A. D. Kurakin⁴,
A. A. Lebedev⁵, E. E. Pyaseckij⁶, K. A. Zotov⁷**

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

^{3,4} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

^{5,6,7} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

² v.l.blinov@urfu.ru

Abstract. The paper considers the concept of a digital twin of a technical device and the vision of this issue by various companies. The features of using digital twins of gas turbine plants are analyzed. The main goals and tasks to be solved by the digital twin of the gas turbine unit at the stage of operation are formulated.

Keywords: gas turbine, digital twin, efficiency and reliability

Развитие цифровых технологий, таких как численное моделирование, интернет вещей (Internet of Things), большие данные, облачные вычисления, дополненная (виртуальная) реальность, обеспечивают современный процесс цифровизации промышленности. Цифровая трансформация промышленности оказывает влияние на все этапы жизненного цикла продукта: от разработки и производства до эксплуатации и утилизации. Результатом применения цифровых технологий к изделию на различных этапах жизненного цикла является совокупная сущность — цифровой двойник.

На первом этапе развития концепция цифрового двойника была предложена М. Гривсом в 2003 г. в соответствии с его «белой книгой» [1; 2]. Цифровой двойник был определен в трех измерениях: физический объект, цифровой аналог и связь этих двух частей вместе [3]. При этом формирование настоящей концепции реализовано в области жизненного цикла изделия (product lifecycle management, PLM) и предполагает, что взаимодействие виртуального и реального пространств происходят на всех этапах PLM (четыре основных этапа: разработка, производство, эксплуатация, утилизация).

В общем случае цифровой двойник — это виртуальная модель изделия, которая постоянно корректируется и достоверно предсказывает его поведение в течение всего жизненного цикла. По причине новизны понятия, отсутствия общепринятой терминологии и универсальности термина возникает его разночтение. Свое видение рассматриваемого вопроса существует у различных компаний из разных сфер.

Согласно работе ученых Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), основная цель цифрового двойника заключается в снижении денежных и временных затрат на проектирование и производство высокотехнологического конкурентоспособного изделия [4]. Цифровой двойник в таком понимании основывается в первую очередь на использовании высокоточных трехмерных программ физического моделирования.

По мнению исследователей Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA), цифровой двойник — это интегрированное мультидисциплинарное, разномасштабное, вероятностное моделирование агрегата или системы [5]. На основании накопленной информации с датчиков реальных объектов цифровой двойник должен создавать продолжительный прогноз ресурса работы агрегата или системы. Кроме того, с помощью предсказания отклика системы цифровой двойник может предупреждать режимы, которых не было ранее. Также цифровой двойник, по версии ученых NASA, должен обладать способностью уменьшать повреждение и деградацию технических параметров с помощью подключения механизмов самолечения или использования рекомендательных изменений в режиме работы агрегата.

Целью цифрового двойника от компании Siemens [6] является получение более глубокого понимания и предсказание характеристик производительности изделия. Цифровой двойник в таком случае необходим на протяжении всего жизненного цикла продукта, чтобы моделировать, прогнозировать и оптимизировать изделие и систему его изготовления до момента вложения ресурсов в физический прототип изделия. Компания выделяет цифровой двойник продукта, производства и эксплуатации.

В понятие цифрового двойника исследователи компании ANSYS закладывают три базовые идеи [7]. Во-первых, у цифрового двойника обязательно должен быть реальный работающий прототип. Во-вторых, должно быть полное соответствие конкретного цифрового двойника своему конкретному физическому аналогу. В-третьих, должны существовать набор датчиков для измерения физических величин и возможность дальнейшей передачи их в цифровой двойник. Эту задачу может выполнять промышленный интернет вещей и мультифизическая симуляция.

В рамках настоящей работы проанализированы возможные особенности разработки и применения цифровых двойников газотурбинных установок (ГТУ), что позволило выделить несколько основных целей и задач, которые должен решать цифровой двойник ГТУ на этапе эксплуатации.

Основной целью применения цифрового двойника ГТУ на этапе эксплуатации может стать повышение эффективности и надежности эксплуатации оборудования за счет возможности прогнозирования его работы. Основные задачи, которые возможно решить на осно-

ве технологии цифровых двойников: 1) повышение надежности ГТУ и увеличение ее ресурса за счет увеличения наработки при своевременном проведении технического обслуживания по состоянию (в отличие от технического обслуживания по наработке); 2) предсказание и предупреждение повреждений элементов и узлов ГТУ, снижение числа аварийных остановов в эксплуатации; 3) повышение эффективности ГТУ с применением индивидуальных рекомендаций по режимам эксплуатации; 4) повышение уровня обслуживания в эксплуатации через обеспечение и своевременную доставку необходимых запасных частей для сокращения простоя ГТУ в ремонте; 5) формирование направлений модернизации оборудования за счет отработки технических решений в виртуальном пространстве.

Список источников

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [Electronic resource]. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (date of access: 25.11.2020).
2. Tao F., Zhang M., Nee A. Y. C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press, 2019. 282 p.
3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt) [Electronic resource] // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches / ed. F.-J. Kahlen, Sh. Flumerfelt, A. C. Alves. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 0.1007/978-3-319-38756-7_4 (date of access: 25.11.2020).
4. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: краткий доклад (сентябрь 2019 г.) / А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин, Ю. А. Рябов. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 62 с.
5. Glaessgen E. H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles [Electronic resource] // Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2012. DOI: 10.2514/6.2012–1818 (date of access: 25.11.2020).
6. DigitalTwin [Electronic resource] // Siemens. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465> (date of access: 25.11.2020).
7. Брук П. А. Цифровые двойники, основанные на симуляции мультифизических процессов // САПР и графика. 2019. № 7 (273). С. 24–26.

УДК 62-681

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ГЛУБОКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

**В. А. Вавилов¹, С. С. Черепанов², И. И. Фахразиев³, М. Е. Хвалько⁴,
Д. А. Хворенков⁵**

^{1,2,3,4,5} Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

¹ ya.vavilon467@gmail.com

Аннотация. Произведен предварительный расчет работы теплообменника уходящих газов в нескольких конфигурациях для котельных установок свыше 8 МВт. Рассмотрены сопутствующие факторы работы теплообменника.

Ключевые слова: теплообменник, котел, котельная, экология, эффективность, дымоход, энергоэффективность

DEVELOPMENT OF A HEAT RECOVERY SYSTEM FOR EXHAUST GASES OF BOILER PLANTS WITH DEEP COOLING OF COMBUSTION PRODUCTS

**V. A. Vavilov¹, S. S. Cherepanov², I. I. Fakhraziev³, M. E. Khvalko⁴,
D. A. Khvorenkov⁵**

^{1,2,3,4,5} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

¹ ya.vavilon467@gmail.com

Abstract. A preliminary calculation of the operation of the flue gas heat exchanger in several configurations for boiler plants over 8 MW has been performed. The accompanying factors of the heat exchanger operation are considered.

Keywords: heat exchanger, boiler, boiler room, ecology, efficiency, chimney, energy efficiency

Сегодня развитие энергетического комплекса сконцентрировано на повышении энергетической и экологической эффективности

применяемого оборудования [1–4]. Так, за счет повышения энергоэффективности можно добиться снижения тепловых потерь. В настоящей работе изучается возможность применения теплообменных аппаратов для охлаждения и утилизации теплоты уходящих газов котельных. В качестве примера рассматривается котельный агрегат с номинальной мощностью вырабатываемой тепловой энергии 8 МВт.

Для предварительного расчета был выбран теплообменник производства компании «Энтророс» (Россия). Рассматриваемый теплообменный аппарат, представленный на рисунке, монтируется на индивидуальный дымоход котла мощностью 8 МВт.

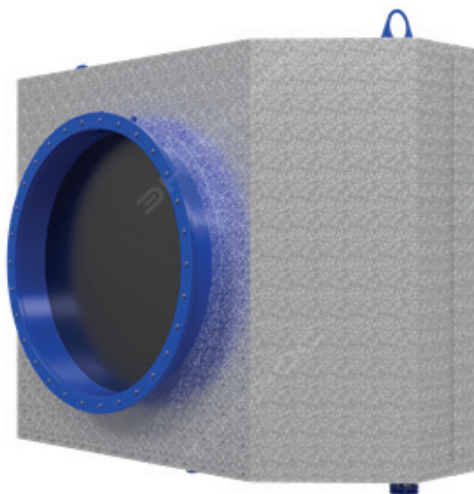


Рис. Теплообменник дымовых газов «Энтророс» [5]

Теплообменник дымовых газов предназначен для сбережения энергии посредством снижения температуры дымовых газов и нагрева обратной котловой воды. При соблюдении всех правил эксплуатации прирост коэффициента полезного действия (КПД) составляет до 5 %. Это значительно сократит время окупаемости отопительного оборудования и снизит затраты на топливо [5].

Установка теплообменника обеспечивает уменьшение температуры уходящих газов на выходе из дымовой трубы, оказывая тем самым влияние на границы санитарно-защитной зоны [6, 7]. Как отмечается в таблице, применяемый теплообменник позволяет использовать котлы любого производства, любой проектируемой схемы подключения и температуры теплоносителя (таблица).

Таблица

Показатели теплообменника, предоставленные
компанией «Энтророс»

№ п/п	Наименование показателя	Данные	
1	Тип котла	ТТ100 8000	
2	Производительность, МВт	8,0	
3	Количество теплообменных аппаратов (расположение на газоходе), шт.	1	2 (последовательно)
4	Топливо	Природный газ	Природный газ
5	Температурный режим, °С	115–70	
6	КПД котла с теплообменником (ТО), %	96,3	98,3
7	Температура уходящих газов за ТО, °С	104	62
8	Расход топлива, кг/ч (нм ³ /ч)	610 (812)	597 (795)
9	Расход дымовых газов, кг/с	3,33	3,26
10	Аэродинамическое сопротивление котла и теплообменного аппарата, Па	1229	1250
11	Расход воды через котел (при $\Delta t = 25$ °С), м ³ /ч	157,7	157,7
12	Гидравлическое сопротивление котла, Па	575	575
13	Теплообменник (ТО)	ЭФ.152.007.000	ЭФ.152.007.000×2
14	Производительность ТО, кВт	288	438
15	Температура уходящих газов перед ТО, °С	173	171
16	Аэродинамическое сопротивление ТО, Па	96	168
17	Температура воды на входе в ТО, °С	5	5
18	Температура воды на выходе из ТО, °С	17,2	23,6
19	Температурный перепад, °С	12,2	18,6
20	Расход воды через ТО, м ³ /ч	20	20
21	Гидравлическое сопротивление ТО, Па	841	210

На основе представленных выше данных можно сделать следующие выводы:

1) применение одного теплообменного аппарата позволяет повысить КПД котла с 94,0 до 96,3 %;

2) температурный перепад теплоносителя, проходящего через теплообменный аппарат, не позволяет эффективно использовать полученную энергию;

3) производительность теплообменного аппарата находится на низком уровне (с учетом полной загрузки котлоагрегата).

Применение теплообменных аппаратов позволяет повысить эффективность котельной в целом. При этом низкий температурный перепад теплоносителя, проходящего через аппарат, ограничивает последующее использование полученной энергии уходящих газов. Вследствие этого теплообменный аппарат обладает сравнительно малой производительностью.

Список источников

1. О теплоснабжении [Электронный ресурс] : федеральный закон от 27.07.2010 № 190-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102975/ (дата обращения: 03.12.2020).

2. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 03.12.2020).

3. ИТС 38–2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям [Электронный ресурс]. М. : Бюро НДТ, 2017. 280 с. URL: <https://www.rst.gov.ru/documentManager/rest/file/load/1520858962627> (дата обращения: 03.12.2020).

4. СП 89.13330.2016. Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35–76 [Электронный ресурс]. Доступ из электрон. фонда прав. и нормат.-тех. документации «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (дата обращения: 03.12.2020).

5. Теплообменник дымовых газов с КПД до 5 % [Электронный ресурс] // Энтропос. URL: <https://www.entropos.ru/produktsiya/kotly-vodogreynye/teploobmennik/> (дата обращения: 03.12.2020).

6. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения [Электронный ресурс] : федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/ (дата обращения: 03.12.2020).

7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03. Проектирование, строительство, реконструкция и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных мест. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_74669/36efb7f10e494f8d980dd74dc3e626deecb1d1bb/ (дата обращения: 03.12.2020).

УДК [622.782.4:622.341.15]:669.184.152.6

ОБЖИГ СИДЕРИТА КОНВЕРТЕРНЫМИ ГАЗАМИ

Е. А. Вараксина¹, А. А. Баскакова², С. В. Картавец³

^{1,2,3} Магнитогорский государственный технический университет
имени Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

² baskakova_1999@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена проблема использования сидеритовых руд. Предложено экономическое обоснованное использование конвертерного газа для обжига сидерита.

Ключевые слова: сидерит, конвертерный газ, количество теплоты, обжиг

FIRING OF SIDERITE WITH CONVERTER GASES

E. A. Varaksina¹, A. A. Baskakova², S. V. Kartavtcev³

^{1,2,3} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

² baskakova_1999@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of using siderite ores. An economically justified use of Converter gas for firing siderite is proposed.

Keywords: siderit, converter gas, heat amount, firing

С давних пор Урал считается железорудной провинцией: следы плавки железа встречаются в Челябинской области в археологических слоях, датируемых VI—V вв. до н. э. Мировую известность имеет Магнитогорское месторождение скарно-магнетитовых руд с запасами более 500 млн т, на базе которого в 1932 г. был построен металлургический завод, известный сегодня как Магнитогорский металлургический комбинат (ММК). Однако все ресурсы не безграничны. За счет местной сырьевой базы Челябинской области потребности ММК покрываются лишь частично. Основную часть запасов железной руды области составляют сидеритовые руды. На обогатительном комплексе ММК при производстве агломерата используется около 6 % сидерита; увеличение процента извлечения невозможно за счет особенностей производства.

За счет обжига сидеритовых руд можно получить чистое железо, однако основную сложность этого процесса представляет карбонат магния, находящийся в руде [1; 2].

Технологические условия переработки сидероплезитовых руд включают в себя нагрев и обжиг при температуре не выше 600–700 °С. В настоящее время обжиг руды ведут в шахтных печах с применением природного газа.

На рис. 1 представлена схема использования сидерита в производстве. В настоящее время в доменное производство поступает только 6 % сидерита. При этом в обход агломерационного и доменного производства предлагается использовать физическую теплоту отходящих конвертерных газов для обжига сидерита и дальнейшего его использования в металлургических целях.

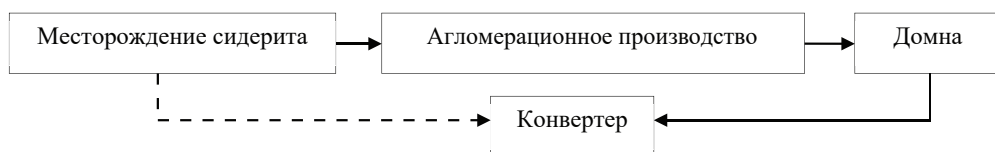


Рис. 1. Схема использования сидероплезитов

Конвертерный газ — ценный вторичный энергетический ресурс черной металлургии. Он отводится от конвертера с температурой 1600 °С [3]. Известно, что из-за периодичности выхода газа проблема его аккумуляции не решена, на действующих крупных конвертерах газ сжигается на свече. Вместо этого целесообразнее потратить его физическую теплоту на обжиг сидеритовых руд.

Для оценки действующей схемы и выбора более эффективного метода обжига руды был произведен сравнительный термодинамический анализ процесса нагрева и обжига сидерита. Который показал, что для обжига 1 т сидеритовой руды требуется энергия в количестве 1,3 МДж [4].

На графике, изображенном на рис. 2, показан процесс обжига сидерита.

Как показано на графике, необходимая температура для обжига руды — 850 °С. В настоящее время эту температуру обеспечивают сжиганием природного газа в смеси с большим количеством воздуха, при этом затрачивается 2297 кДж теплоты топлива, потери которой после обжига составляют 900 кДж.

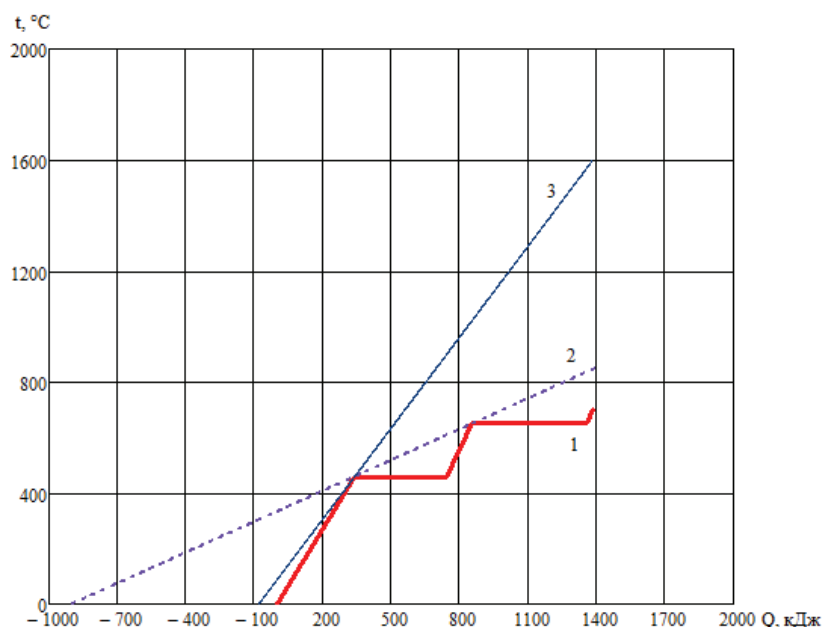


Рис. 2. График обжига сидерита:

1 — процесс обжига сидерита; 2 — охлаждение природного газа;

3 — охлаждение конвертерного газа

При использовании физической теплоты конвертерных газов с температурой выхода из конвертера 1600 °C затрачивается теплота, равная 1465 кДж, при этом значение полезной теплоты практически равно самим затратам (1385 кДж). Потери в этом случае составляют 80 кДж, что в $11,5$ раз меньше, чем при использовании природного газа.

Если разделить теоретически необходимую теплоту на фактическую, можно оценить эффективность обжига. В результате таких вычислений получается, что эффективность обжига конвертерными газами составляет 94% , в то время как эффективность обжига природным газом — 60% .

Таким образом, использование теплоты конвертерных газов позволит добиться снижения потерь теплоты на обжиг сидеритовых руд, повысит эффективность обжига, а также позволит использовать теплоту газа, которая в настоящее время сбрасывается в окружающую среду, создавая дополнительные неблагоприятные условия для экологической ситуации. Также снизятся расход природного газа, который является ценным и важным ресурсом для осуществления рассматриваемых

технологических процессов (поскольку является невозобновляемым), при этом существенно уменьшаются финансовые затраты на покупку газа, что улучшит экономические показатели производства.

Список источников

1. Савченко И. А., Смирнов А. Н., Турчин М. Ю. Подготовка высокомагнезиальных сидеритов Бакальского рудного поля к металлургическому производству методами пиро- и гидрometаллургии [Электронный ресурс] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т. 16, № 3. С. 63–69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podgotovka-vysokomagnezialnyh-sideritov-bakalskogo-rudnogo-polya-k-metallurgicheskomu-proizvodstvu-metodami-piro-i-gidrometallurgii> (дата обращения: 01.12.2020).

2. Селективное извлечение соединений магния и комплексная переработка сидероплезитовой руды [Электронный ресурс] / В. Ф. Костин [и др.] // ТиТМП. 2015. № 2 (17). С. 65–69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/selektivnoe-izvlechenie-soedineniy-magniya-i-kompleksnaya-pererabotka-sideroplezitovoy-rudy> (дата обращения: 01.12.2020).

3. Якушев А. М. Справочник конвертерщика. Челябинск : Металлургия, 1990. 448 с.

4. Запарнюк М. Н., Нешпоренко Е. Г. Термодинамический анализ схем движения дымовых газов в процессе обжига сидерита // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 14-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов / под общ. ред. Е. Б. Агапитова. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2013. 199 с.

УДК 620.9

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

П. А. Вельчинская¹, Е. А. Бирюзова²

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ polina.velchinskaya@mail.ru

Аннотация. В работе перечислены основные причины потерь энергии в тепловых сетях, рассмотрены направления энергосбережения в системах теплоснабжения, а также показаны основные пути решения проблемы, связанной с повышением энергоэффективности сетей теплоснабжения.

Ключевые слова: энергоэффективность, теплоснабжение, теплопотери, снижение теплопотребления, энергосбережение

ENERGY SAVING IN HEAT SUPPLY

P. A. Velchinskaya¹, E. A. Biryuzova²

^{1,2} Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

¹ polina.velchinskaya@mail.ru

Abstract. The paper lists the main causes of energy losses in heating networks. The directions of energy saving in heat supply systems are considered, as well as the main ways of solving the problem associated with increasing the energy efficiency of heat supply networks.

Keywords: energy efficiency, heat supply, heat loss, reduction of heat consumption, energy saving

Проблема энергосбережения играет важнейшую роль в устойчивом экономическом развитии страны: определении стоимости товаров и услуг, конкурентоспособности страны на международных рынках. В декабре 2015 г. по итогам 21-й конференции, проводимой в рамках Рамочной конвенции об изменении климата, Россией было подписано Парижское соглашение о снижении выбросов парниковых

газов в атмосферу в целях предотвращения необратимых последствий для экологии человечеству [1]. Одним из ключевых аспектов для исполнения обязательств по соглашению является энергосбережение. Потребление топлива теплоснабжением равняется всему топливному экспорту страны [2], поэтому энергосбережение в системах теплоснабжения является задачей первостепенной важности.

Потери тепловой энергии подразделяются на три категории: 1) потери на источнике тепла; 2) потери при транспортировке; 3) потери у потребителя. Основными причинами потери энергии на источнике тепла является устаревшее и изношенное оборудование. Потери теплоты при транспортировке возникают из-за коррозии трубопроводов, поврежденной теплоизоляции, большой протяженности тепловых сетей от источника теплоты до потребителей. К потерям энергии у потребителя можно отнести несоответствие характера отопления погодным условиям в определенный момент времени, отсутствие рециркуляции в системах горячего водоснабжения (ГВС). Кроме того, косвенной причиной является отсутствие приборов учета тепловой энергии у потребителей.

Рассмотрим направления по внедрению инноваций по энергосбережению теплоснабжения.

Модернизация котельных. Основными направлениями работ в настоящей области являются: 1) замена устаревшего теплоэнергетического оборудования на современное и более мощное; 2) внедрение систем автоматизации; 3) установка приборов учета расхода топлива; 4) усовершенствование системы водоподготовки сетевой воды для снижения скорости внутренней коррозии трубопроводов тепловых сетей. Представленные мероприятия повысят коэффициент полезного действия (КПД) котельных, сократят эксплуатационные расходы, обеспечат надежную работу оборудования, а также снизят количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Реконструкция тепловых сетей. Строительство новых зданий и сооружений влечет за собой увеличение тепловых нагрузок потребителей, а износ старого оборудования ведет к аварийности тепловых сетей и увеличению тепловых потерь. По этой причине для эффективного и надежного теплоснабжения потребителей с учетом перспективных тепловых нагрузок должна быть предусмотрена своевременная замена изношенного оборудования новым [3; 4].

Применение современных материалов и технологий при прокладке трубопроводов тепловых сетей. Одной из основных задач энергос-

бережения является борьба с потерями теплоты при транспортировке теплоносителя, которая решается применением предварительно изолированных труб в пенополиуретановой (ППУ) оболочке. Срок службы ППУ-изоляции составляет 30 лет без ухудшения свойств материала. Кроме того, она защищает трубопровод от блуждающих токов, агрессивных сред и внешней коррозии. В настоящее время при строительстве и реконструкции внутриквартальных тепловых сетей широко внедряется новый тип пластиковых труб из сшитого полиэтилена, армированного высокопрочными нитями арамидного волокна (изопрофлекс), а также гофрированные трубы из нержавеющей стали с изоляцией из пенополиизоцианурата (касафлекс) [5]. Такие материалы устойчивы к коррозии и увеличивают срок службы тепловых сетей до 50 лет [3; 4; 6–8].

За счет автоматического регулирования теплопотребления можно достичь экономии тепловой энергии в системах теплоснабжения до 20–30 %. Наиболее полно и эффективно задачи автоматизации могут быть реализованы с помощью узла учета тепловой энергии с возможностью регулирования теплопотребления по желанию потребителя в зависимости от температуры наружного воздуха, назначения объекта. Узел учета тепловой энергии — это комплекс приборов и устройств, которые обеспечивают учет тепловой энергии, объема теплоносителя, а также контроль и регистрацию его параметров. Стандартный узел учета тепла состоит из: вычислителя, преобразователей расхода, температуры, давления, приборов индикации температуры и давления, а также запорной арматуры. Установка приборов учета тепловой энергии позволяет потребителям вести учет теплоносителей и подразумевает новое отношение к потреблению тепловой энергии, созданию нормативно-правовой базы [9], которая способствует повышению экономических стимулов к энергосбережению у всех участников процесса теплоснабжения. Позволяет производить оплату тепловой энергии только по показаниям узла учета тепла, а не по стандартным расчетным нормам, которые зачастую завышены.

Список источников

1. Россия в Парижском соглашении [Электронный ресурс] // ТАСС. 2020. 11 дек. URL: <https://tass.ru/obschestvo/10230505> (дата обращения: 15.12.2020).

2. Михайлов С. А., Семенов В. Г. Теплоснабжение Российской Федерации в цифрах [Электронный ресурс] // РосТепло.ru. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=640 (дата обращения: 10.12.2020).

3. Раздобреева А. С., Бирюзова Е. А. Энергосбережение в системах теплоснабжения // Современные тенденции развития науки и производства : сб. материалов VII Международ. науч.-практ. конф. Кемерово : Запад.-Сибир. науч. центр, 2017. С. 334–335.

4. Бирюзова Е. А. Повышение энергоэффективности современных систем теплоснабжения // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сб. ст. XIV Международ. науч.-техн. конф. / под ред. Н. Н. Ласкова. Пенза : Приволж. Дом знаний, 2014. С. 23–26.

5. Тепловые сети [Электронный ресурс] // ТЭК СПб. URL: <https://www.gptek.spb.ru/product/teploseti/> (дата обращения: 11.12.2020).

6. Бирюзова Е. А. Исследование энергоэффективности современных теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения [Электронный ресурс] // Инженерные системы и сооружения. 2014. № 4–2 (17). С. 102–109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22258688> (дата обращения: 10.12.2020).

7. Бирюзова Е. А. Повышение энергоэффективности тепловых сетей за счет применения современных теплоизоляционных материалов [Электронный ресурс] // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 62–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18778211> (дата обращения: 10.12.2020).

8. Бирюзова Е. А. Методы повышения энергоэффективности системы теплоснабжения [Электронный ресурс] // Известия Юго-Запад. гос. ун-та. 2011. № 5–2 (38). С. 389–392. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17263924> (дата обращения: 10.12.2020).

9. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 26.07.2019). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 11.12.2020).

УДК 697.92

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ СВАРОЧНО-СБОРОЧНОГО ЦЕХА ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВОЙ ВОЗДУХОРАЗДАЧИ

А. В. Ворончихин¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ voronchikhin_aleshenka@mail.ru

Аннотация. Проведен сравнительный анализ энергоэффективности применения вихревой вентиляции в сварочно-сборочном цехе крупногабаритных изделий по сравнению с общеобменной вентиляцией. Разработана геометрическая модель вихревой воздухоораздачи в среде ANSYS.

Ключевые слова: энергоэффективность, воздухоораздача, вихревая вентиляция, производственные здания

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE WELDING AND ASSEMBLY SHOP VENTILATION SYSTEM USING VORTEX AIR DISTRIBUTION

A. V. Voronchihin¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ voronchikhin_aleshenka@mail.ru

Abstract. A comparative analysis of the energy efficiency of using vortex ventilation in the welding and Assembly shop of large-sized products in comparison with General exchange ventilation is carried out. A geometric model of vortex air distribution in the ANSYS environment is developed.

Keywords: energy efficiency, air distribution, vortex ventilation, industrial buildings

Строительство многопролетных производственных зданий большого объема, оснащенных сварочным оборудованием, требует создания энергоэффективных способов организации воздухообмена, отвечающих при этом требованиям СанПиН и ГОСТ 12.1.005–88.

Всероссийским центральным научно-исследовательским институтом охраны труда (ВЦНИИОТ) разработан способ вентиляции помещений производственного назначения с вихревой воздухоподачей [1], которая по сравнению с общеобменной вентиляцией позволяет значительно сократить расходы воздуха (на 20–50 %) [2] и, соответственно, расход электроэнергии на привод вентиляторов вентиляционных установок, повышая энергоэффективность [3].

Вентиляцию с вихревой воздухоподачей организуют посредством подачи воздуха тангенциально по контуру вентилируемого объема горизонтальными плоскими или компактными струями из воздухо-распределительных устройств (ВРУ), установленных на колоннах или иных строительных конструкциях. Отработавший воздух удаляют механически воздуховытяжным устройством (ВВУ), расположенным на оси вихря в покрытии или ниже его (рис. 1).

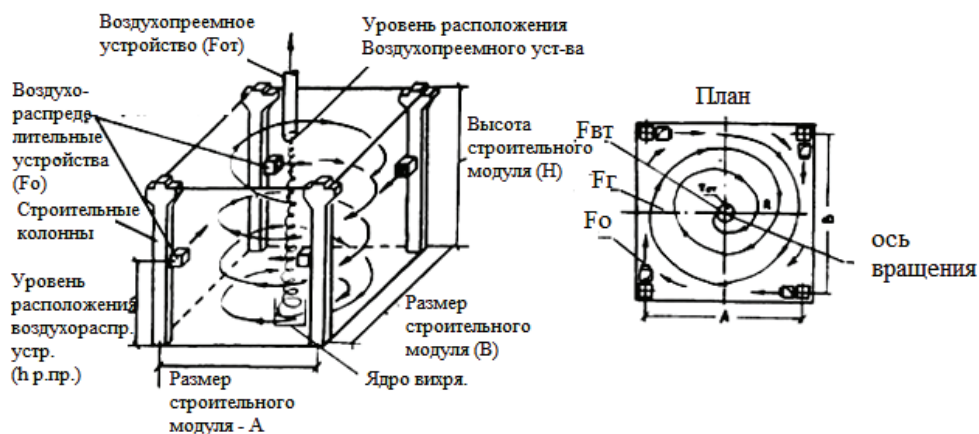


Рис. 1. Схема организации вихревой воздухоподачи в строительном модуле [2]

Вблизи оси вихря создается разрежение [4], способствующее движению загрязненного воздуха от периферии к оси и выносу вредных

выделений вертикальным потоком вверх к воздуховытяжному устройству [2]. При организованном вихревом течении воздуха в выделенном строительном объеме температура воздуха и концентрации вредных веществ распределяются с минимальным значением по периметру объема и с максимальным вблизи его вертикальной оси (на поверхности ядра вихря) независимо от расстановки оборудования и занимаемой им площади, что весьма существенно в сварочно-сборочных цехах при производстве крупногабаритных изделий (например, трубных пучков котлов). В этом случае использование местных отсосов невозможно, т. к. персонал при выполнении работ перемещается по большой площади, а общеобменная вентиляция неэффективна и энергозатратна.

Согласно «Методическим указаниям по проектированию вихревой вентиляции» помещение, вентилируемое одним вихрем, должно иметь форму квадрата (отношение сторон 1 : 1) или прямоугольника с отношением сторон 1,0: 1,5, что соответствует проектным решениям сварочно-сборочных цехов [2]. В многопролетных зданиях большой длины рекомендуется организовывать несколько вихрей, что также выполнимо на таких объектах [2]. При этом приточный воздух подается выше рабочей зоны, а ВРУ устанавливаются на одном уровне от пола по контуру вентилируемого объема на колоннах и формируют при истечении воздуха компактные или плоские струи.

Геометрия моделируемого помещения сварочно-сборочного цеха соответствует следующим параметрам: ширина — 18 м, длина — 90 м, высота — 6 м, вентилируемый объем — 9720 м^3 , площадь пола — 1620 м^2 . В соответствии с унифицированными размерами производственных зданий (пролет — 18 м, шаг колонн — 6 м) при отношении сторон 1 : 1 требуемое количество вихрей — 5.

Расчеты по методике, указанной в вышеупомянутой работе [2], показывают, что эффективность применения вихревой воздухоподдачи по сравнению с общеобменной вентиляцией при использовании компактных струй составляет 13,6 %, плоских — 48,6 %.

С целью верификации той же методики [2] численным экспериментом в пакете ANSYS построена геометрическая модель вентилируемого объема с размерами $18 \times 18 \times 6$ (рис. 2). Построенная конечно-элементная сетка состоит из 94 000 узлов, 513 958 элементов.

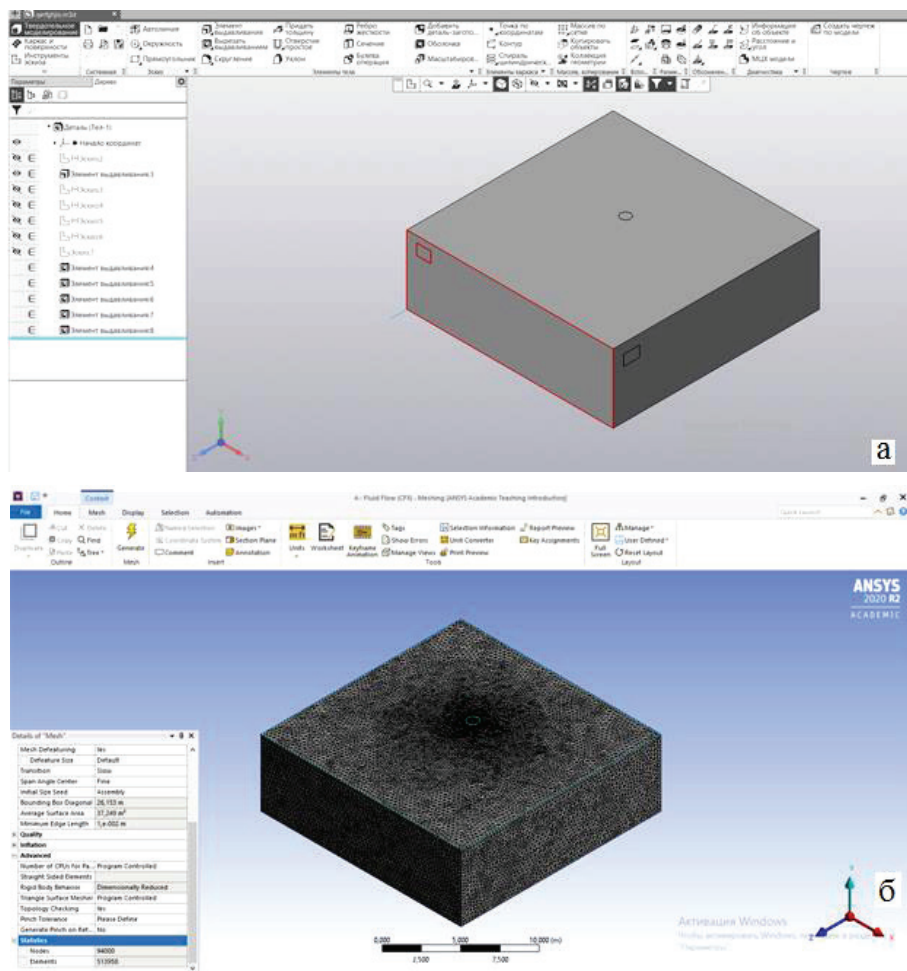


Рис. 2. Геометрическая модель (а) строительного модуля и конечно-элементная сетка (б)

Моделирование в пакете ANSYS позволяет: 1) детализировать картину вихревого течения в исследуемом строительном объеме; 2) оптимизировать размещение воздухораспределительных устройств разных типов и воздухоприемного устройства.

Список источников

1. СП 60.13330.2016. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Электронный ресурс]. URL: <http://sniprf.ru/sp60-13330-2016> (дата обращения: 27.11.2020).

2. Методические указания по проектированию вихревой вентиляции / отв. ред. Л. В. Кузьмина. М. : ВЦНИИОТ, 1984. 52 с.
3. Велькин В. И., Щелоков Я. М., Щеклеин С. Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 312 с.
4. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.

УДК 697.341

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Е. М. Демиденко¹, Е. А. Бирюзова²

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ eliz.demidenko@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы использования новых современных материалов в тепловых сетях, экономия и эффективность применения композитных материалов в системах теплоснабжения. Определяется актуальность и возможность применения новых видов композитов при ремонте и реконструкции тепловых сетей.

Ключевые слова: теплоснабжение, композитные материалы, тепловые сети, текущие и капитальные ремонтные работы

ANALYSIS OF APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

E. M. Demidenko¹, E. A. Biryuzova²

^{1,2} Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

¹ eliz.demidenko@yandex.ru

Abstract. This article discusses the use of new modern materials in heating networks. Economy and efficiency of using composite materials in heat supply systems. The relevance and possibility of using new types of composites in the repair and reconstruction of heating networks is determined.

Keywords: heat supply, composite materials, heating networks, current and major repairs

Строительная отрасль не стоит на месте, потому для эффективной эксплуатации систем теплоснабжения — тепловых сетей (ТС) —

необходимо разрабатывать меры по противодействию появления дефектов, а также своевременному их обнаружению и ликвидации. Существует множество конструкций ТС, которые не подвергаются ремонту эксплуатирующих организаций, а сразу заменяются на новые элементы, что приводит к удорожанию обслуживания. Мировая статистика показывает, что около 15–20 % дефектов трубопроводов и запорной арматуры в системах тепло- и водоснабжения может быть выполнена за счет технологии применения композитных материалов, работающих на основе «холодной сварки». Использование этой технологии приведет к значительной экономии материальных и трудовых ресурсов.

Композитные материалы применяются при выполнении ремонтных работ из-за следующих свойств: 1) незначительный вес; 2) высокая механическая прочность; 3) коррозионная стойкость; 4) стойкость к истиранию; 5) низкая стоимость.

Объекты теплоснабжения состоят в основном из трубопроводов, запорной арматуры, теплофикационного оборудования, насосных станций и т. д. Ремонт и осмотр такого оборудования может проходить при текущем или капитальном ремонте [1].

Текущий ремонт представляет собой комплекс профилактических мероприятий, выполняемых систематически в целях предупреждения преждевременного износа отдельных элементов системы теплоснабжения и устранения мелких дефектов. Работы по текущему ремонту проводят регулярно в течение всего отопительного сезона и выполняются обходчиками тепловых сетей и дежурными тепловых пунктов в ходе эксплуатации. Мелкий профилактический ремонт (например, замена сальниковых уплотнений фланцевых соединений, чистка дренажей, воздушников, правка и крепление опор, смазка трущихся элементов и др.) выполняют без отключения теплопроводов. Текущий ремонт крупного оборудования и отдельных частей конструкции может выполняться при кратковременном отключении участков сети.

Капитальный ремонт предназначен для полного восстановления изношенных элементов и реконструкции системы с применением более экономичного и современного оборудования. Ремонтные работы проходят в летний период. Негодные материалы и оборудование заменяют. Однако процент замены не должен превышать установленные нормы годовых расходов материалов на ремонт.

Устранение дефектов ремонтными композитными материалами является эффективным и ресурсосберегающим методом восстановления оборудования (рис. 1). Стали все чаще применяться композиционные материалы. Их использование позволяет заменить традиционные методы соединений на новейший технологический процесс — «холодную сварку», которая включает в себя склеивание, формование, устранение дефектов с помощью металлополимерных и анаэробных материалов.



Рис. 1. Восстановленное рабочее колесо центробежного насоса

Материалы для восстановления теплофикационного оборудования включают в себя металлополимеры универсальные, антифрикционные, керамические, защитные антикоррозионные и противоизносные покрытия, а также анаэробные фиксаторы и уплотнители, смазочные материалы, очистители и др. [2; 3]. Выход из строя оборудования водоснабжения и теплоснабжения происходит по ряду причин. Традиционным методом устранения дефектов часто является замена поврежденного оборудования на новое. Подобные методы ремонта весьма дорогостоящи и не всегда эффективны. В настоящее время ремонтные композитные материалы успешно применяются для ремонта оборудования и изделий в различных отраслях промышленности, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ) при эксплуатации систем водоснабжения и канализации, отопления, горячего водоснабжения (ГВС), тепловых сетей (ТС) и газоснабжения. Схема применения композитных материалов показана на рис. 2.

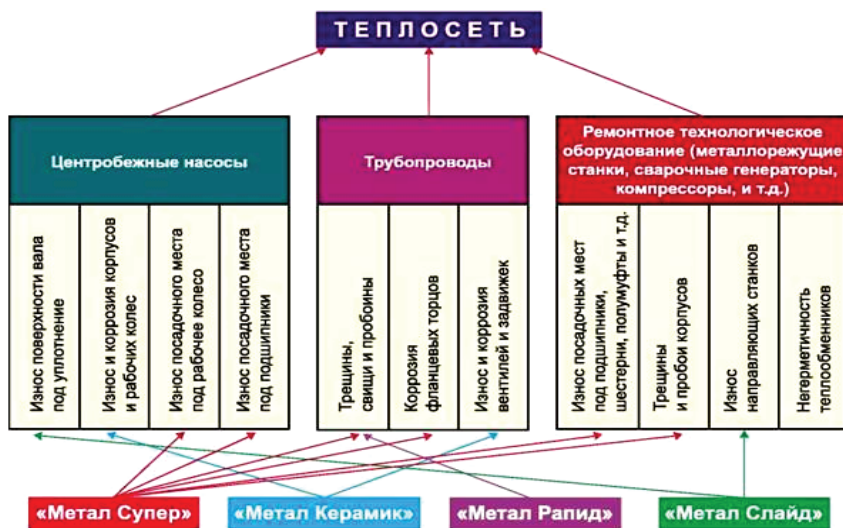


Рис. 2. Схема применения композитных материалов в тепловых сетях

Таким образом, можно сделать вывод, что применение композиционных материалов при ремонте и реконструкции в различных областях строительства обеспечивает увеличение срока службы элементов, уменьшение себестоимости работ примерно на 15–20 % и сокращает применение металла на 40–50 % [4].

Список источников

1. Машенков А. Н., Филимонов А. В. О контроле состояния тепловых сетей [Электронный ресурс] // РосТепло.ru. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=867 (дата обращения: 10.12.2020).
2. Тулинов А. Б., Иванов В. А. Возможности устранения дефектов теплофикационного оборудования композиционными материалами // Сервис в России и за рубежом. 2013. № 1 (39). С. 162–173.
3. ГОСТ Р 55068–2012. Трубы и детали трубопроводов из композитных материалов на основе эпоксидных связующих, армированных стекло- и базальтоволокнами. Технические условия [Электронный ресурс]. Доступ из электрон. фонда прав. и нормат.-тех. документации «Кодекс». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104721> (дата обращения: 10.12.2020).
4. Прогрессивные технологии ремонта оборудования теплосетей с использованием композиционных материалов [Электронный ресурс] / А. Б. Тулинов [и др.] // РосТепло.ru. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2211 (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 621.182

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. С. Доронин¹, К. В. Трубицын², В. К. Ткачев³

^{1,2,3} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹ doronin.as@samgtu.ru

Аннотация. В работе представлены итоги первого этапа проектирования и разработки нового типа газовых котельных с линейкой мощности от 200 до 1000 кВт при использовании исключительно отечественного оборудования. Необходимость ее выполнения связана с низкой эффективностью существующих котельных. Их основные недостатки: повышенная температура уходящих газов из-за низкой эффективности применяемых теплообменников; недожог газа из-за применения малоэффективных горелочных устройств; большие габариты и вес конструкции из-за низкоэффективных теплообменников; большие потери теплоты через несовершенную изоляцию.

Ключевые слова: водогрейный котел, энергетическая эффективность, отечественное оборудование, интенсификация теплообмена, теплообменник

DESIGN OF A HOT WATER BOILER TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

A. S. Doronin¹, K. V. Trubitsyn², V. K. Tkachev³

^{1,2,3} Samara State Technical University, Samara, Russia

¹ doronin.as@samgtu.ru

Abstract. This work represents the first stage in the design and development of a new type of gas boiler houses with a power range from 200 to 1000 kW using only domestic equipment. The need for its implementation is associated with the low efficiency of existing boiler houses. Their main disadvantages: increased flue gas temperature (due to the low effectiveness of heat exchangers); incomplete combustion

of gas (due to inefficient burners); large size and weight of the structure (dependent low-efficiency heat exchangers); large heat losses through imperfect insulation.

Keywords: hot water boiler, energy efficiency, domestic equipment, heat exchange intensification, heat exchanger

В настоящее время и в перспективе одним из важных путей повышения эффективности энерготехнологических установок является совершенствование теплообменного оборудования с помощью внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена. Такие способы разработаны и исследованы в неодинаковой степени, лишь часть из них доведена до уровня промышленного использования. По этой причине проектирование нового эффективного теплообменного оборудования и модернизация существующего (даже на основе апробированных на практике методов интенсификации) требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики течения в каналах, а также разработки моделей и методов для их теплогидравлического расчета.

Разработаны и исследуются различные методы интенсификации теплообмена. Принципиально их классифицируют на две категории: активные и пассивные.

Широко известным способом интенсификации теплообмена на границе жидкость — газ является применение теплообменных каналов, соединенных между собой вставками, ребрами, трубами разного сечения.

Общая картина обтекания трубы в пучке зависит от расположения труб и геометрических параметров пучка. В большинстве случаев трубы в пучках располагаются в шахматном или коридорном порядке [1].

Коэффициент полезного действия установок, предназначенных для нагрева жидкостей и газов, в наибольшей степени зависит от эффективности применяемых в них теплообменников. Для проведения такого вида исследований создана экспериментальная установка. Проверка работоспособности установки выполнена путем определения мощности стандартной чугунной радиаторной батареи отопления мощностью 1120 Вт. Исследования на установке показали ее мощность, равную 1160 Вт, т. е. погрешность прибора находится в пределах допустимых 5 %.

Экспериментальные исследования выполнялись для трех типов теплообменников, из которых первые два имели одинаковые размеры и отличались лишь тем, что один из них оребренный: поперечные ре-

бра высотой 17 мм и толщиной 2 мм приварены к корпусу трубы с шагом 5 мм. Третий тип теплообменника представляет собой последовательно соединенные секции, каждая из которых содержит четыре параллельно соединенные трубы малого диаметра [2].

Основная цель исследования заключалась в оценке влияния оребрения на изменение мощности по сравнению с аналогичным по размерам неоребранным теплообменником.

После проведения расчетов результаты позволяют сделать вывод, что семикратное превышение поверхности оребренного теплообменника по сравнению с неоребранным приводит к возрастанию мощности всего лишь в 1,5 раза.

При естественной конвекции мощность прибора с параллельно-последовательным соединением труб оказалась больше мощности оребренного теплообменника примерно на 100 Вт.

В довершение была разработана конструкция газовой котельной мощностью 200 кВт, включающая в себя: 1) неоребранные экранные трубы; 2) оребренные трубы потолочного экрана; 3) оребренные трубы экономайзера, расположенного в газоходе котла. Давление воды на входе в котел — 7 атм, температурный график теплосети — 95/70 градусов. Котел включает в себя корпус, горелочные устройства, экранные трубы, потолочный экран, экономайзер. Потолочный экран и экономайзер выполнены из оребренных труб диаметром 57 мм. Высота ребер — 17 мм, толщина ребра — 1,5 мм, расстояние между ребрами — 5 мм. Экранные трубы выполнены из гладких труб диаметром 57 мм.

Выполненный тепловой расчет котла показал, что для обеспечения заявленной мощности 200 кВт длина экранных труб ($57 \times 3,5$ мм) должна составить 30 м; оребренных труб потолочного экрана ($57/911$) — 3,52 м; оребренных труб экономайзера ($57/911$) — 8,8 м. Выполненный гидравлический расчет котла показал, что потеря напора по водяному тракту составляет 31 000 Па; из них экранные трубы — 18 000 Па; трубы потолочного экрана и трубы экономайзера с обвязкой — 12 500 Па. Аэродинамический расчет котла показал, что общее сопротивление котла по газу составляет 34 Па. При этом скорость течения газа в области потолочного экрана и в области экономайзера — 4,66 м/с [3].

Вес трубной части котла — 280 кг, вес обшивки с изоляцией — 200 кг, вес горелочных устройств (без учета кирпичной футеровки) — 30 кг. Общий вес котла, включая вес воды в трубах, составляет 560 кг (вес воды — 50 кг).

Представленные на российском рынке отопительной техники газовые водогрейные котлы имеют различные конструкции и массогабаритные характеристики, вес некоторых достигает свыше 750 кг, объем воды в котле — 300 л. Разработанный котел аналогичной мощности имеет средний вес 510 кг, при этом площадь поверхности, занимаемая котлом, составляет всего 1,1 м², что выгодно для размещения его в небольших котельных, удобству для управления и обслуживания.

Список источников

1. Кудинов В. А., Карташов Э. М., Стефанюк Е. В. Техническая термодинамика и теплопередача. М. : Юрайт, 2016. 566 с.
2. Ткачев В. К., Доронин А. С., Еремин А. В. Исследование тепловой эффективности теплообменников из оребренных труб // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 392–396.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. 256 с.

УДК 621.313.17:621.928

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Д. О. Забалуева¹, Э. В. Гиззатуллин², А. Ю. Коняев³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ dashenka.1998zabalueva@mail.ru

Аннотация. В работе показано применение электродинамических сепараторов для извлечения металлов из потока твердых отходов. Для снижения мощности, потребляемой сепаратором из сети, предложено использовать модульную конструкцию индуктора сепаратора. Показано сравнение траекторий движения частиц металла в базовом варианте сепаратора и при использовании индукторов модульной конструкции.

Ключевые слова: электродинамический сепаратор, энергопотребление, индукторы модульной конструкции

INCREASING THE EFFICIENCY OF EDDY-CURRENT SEPARATION OF SOLID WASTE IN A TRAVELING MAGNETIC FIELD

D. O. Zabalueva¹, E. V. Gizzatullin², A. Yu. Konyaev³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ dashenka.1998zabalueva@mail.ru

Abstract. The paper shows the use of eddy-current separators for the extraction of metals from a solid waste stream. To reduce the power consumed by the separator from the network, it is proposed to use a modular design of the separator inductor. Shown is a comparison of the trajectories of metal particles in the basic version of the separator and when using a modular design of inductors.

Keywords: eddy-current separator, energy consumption, modular design of inductors

Промышленная переработка твердых отходов производства и потребления становится одним из приоритетов в развитии экономики России. Использование компонентов отходов в качестве вторичного сырья позволяет существенно улучшить экономические показатели такой переработки. К наиболее ценным вторичным ресурсам относятся цветные металлы, попадающие в отходы с ломом электротехнического и электронного оборудования, автомобильным ломом, в виде использованных тары и упаковок.

В мировой практике для извлечения цветных металлов из твердых отходов используется метод электродинамической сепарации [1; 2]. При этом используются два типа установок. Сепараторы с вращающимся индуктором на основе постоянных магнитов имеют малое энергопотребление, что обусловило их широкое применение. В то же время сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов обладают большой производительностью и универсальностью, могут встраиваться в готовые технологические линии. Линейные индукторы могут устанавливаться под лентой конвейера, перемещающего отходы, либо под наклонной плоскостью в местах перегрузки. Основным недостатком таких сепараторов является большое энергопотребление. Например, индуктор сепаратора КМ-203 М, разработанного в Уральском федеральном университете (УрФУ) совместно с ОАО «Уралэнергоцветмет», имеет мощность $S = 111$ кВА при $\cos\varphi = 0,06$. Из этого следует, что поиск путей повышения энергоэффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукционных машин (ЛИМ) является актуальной задачей.

В УрФУ разработаны методики расчета электромагнитных усилий и мощности, потребляемой ЛИМ, а также траекторий движения частиц в сепараторе под действием электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил. В качестве примера на рис. 1 показаны траектории движения частиц в сепараторе КМ-203 М при различном значении удельных электромагнитных усилий F_m (отношение усилия к массе частицы, Н/кг или м/с²). Индуктор сепаратора, показанный пунктирной линией, имеет размеры активной зоны $1,4 \times 0,3$ м и устанавливается под лентой конвейера шириной $B_k = 1,2$ м, перемещающего отходы со скоростью $V_k = 1,0$ м/с. Попадая в активную зону ЛИМ, частицы металлов совершают сложное движение, перемещаясь по ленте конвейера в направлении оси x и двигаясь под действием электромагнитных сил в поперечном направлении. На выходе из активной зоны частицы

двигаются по инерции с замедлением. Нетрудно заметить, что в таком сепараторе могут извлекаться (перемещаться за пределы ленты) только частицы, на которые действуют удельные усилия, большие 20 Н/кг. Как показывают расчеты, такие усилия могут развиваться только на частицах крупностью более 50 мм (в расчете на алюминий). Такие оценки совпадают с результатами испытаний сепаратора [2].

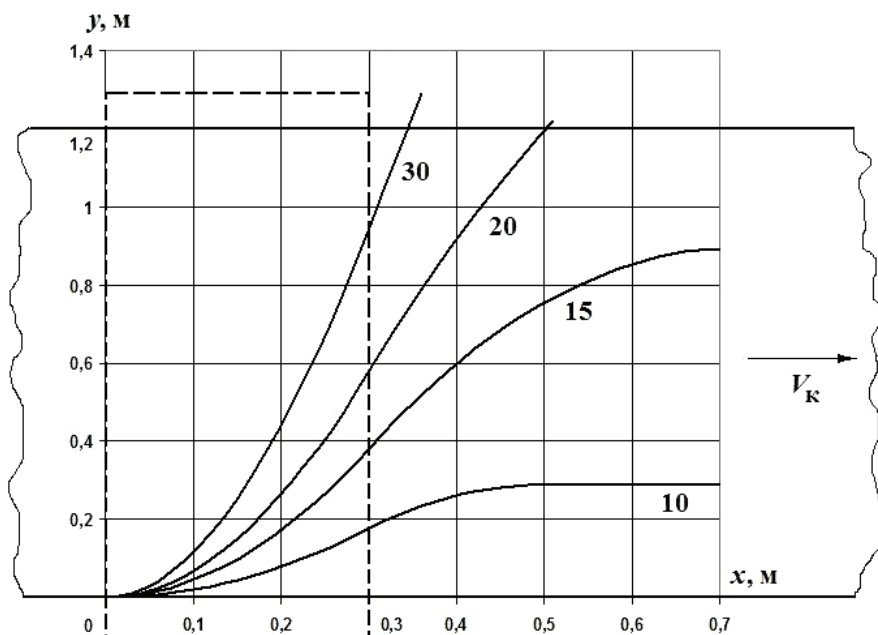


Рис. 1. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе при разных значениях удельных электромагнитных усилий (F_m , Н/м — цифры на графиках)

Для извлечения частиц крупностью менее 50 мм необходимо увеличивать габариты и потребляемую мощность ЛИМ в 2–3 раза, что неприемлемо. По этой причине предлагается использовать конструкцию сепаратора с модульным построением ЛИМ. Результаты расчета траекторий движения частиц для такой конструкции сепаратора представлены на рис. 2. Индуктор сепаратора разбит на три модуля, устанавливаемых под лентой со смещением в направлении движения частиц, как показано на рис. 2. Можно видеть, что в этом случае будут извлекаться частицы, на которые действует удельное электромагнитное усилие, большее 12 Н/кг.

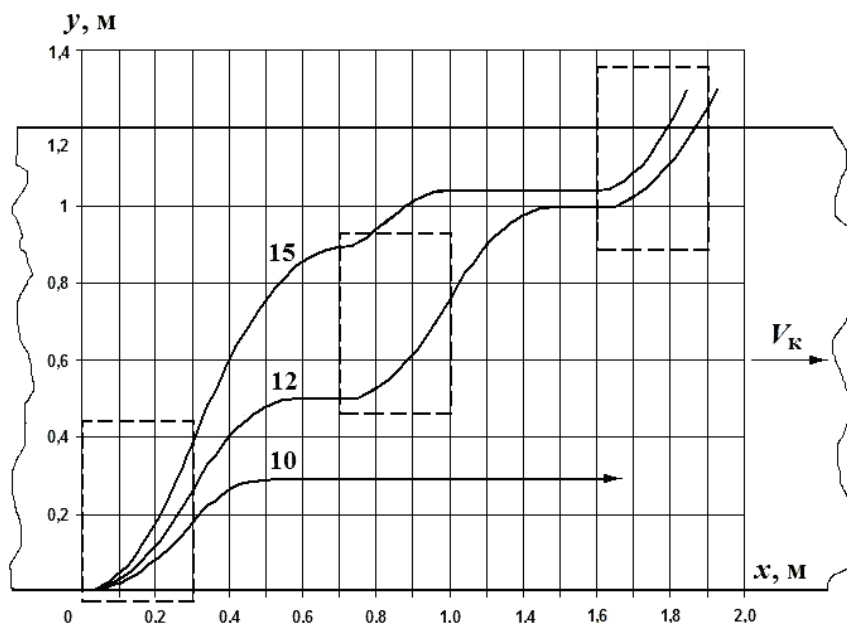


Рис. 2. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе с модульной конструкцией ЛИМ (цифры на графиках — F_m , Н/м)

Полученный результат свидетельствует о возможности увеличения выхода сепарируемого металла за счет уменьшения крупности извлекаемых частиц при том же потреблении энергии либо о возможности уменьшения мощности ЛИМ и снижении расхода электроэнергии при том же выходе металла, что и в базовом варианте. Дополнительным достоинством модульного построения ЛИМ является то, что при наличии трех модулей и использовании транспозиции фаз обмотки можно добиться полной симметрии токов. Это позволяет компенсировать реактивную энергию ЛИМ, повысив $\cos\varphi$ до уровня 0,95–1,00. При этом потребляемая из сети мощность сепаратора снижается до значений 6–8 кВА.

Список источников

1. Wilson R. J., Veasey T. J., Squires D. M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes // Minerals Engineering. 1994. № 7. P. 975–984.
2. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А. А. Патрик [и др.] // Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16–19.

УДК 621.438

АЛГОРИТМ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

**И. С. Зубков¹, П. И. Плишкин², Е. Ю. Искорцев³,
О. В. Беляев⁴, В. Л. Блинов⁵**

^{1,2,3,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ lanqtada@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм анализа влияния дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора на характеристики работы газотурбинной установки. На основе математического описания топологии геометрии лопаточного профиля, разработан алгоритм построения проточной части осевого компрессора с возможностью внесения локальных дефектов и изменений в лопаточный аппарат для решения задач учета влияния таких изменений на работу турбомашин.

Ключевые слова: газотурбинная установка, осевой компрессор, лопаточный аппарат, дефекты лопаток, геометрические отклонения, математическое описание

ALGORITHM FOR TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF DEFECTS IN THE BLADE APPARATUS OF AN AXIAL COMPRESSOR

I. S. Zubkov¹, P. I. Plishkin², E. Yu. Iskorcev³, O. V. Belyaev⁴, V. L. Blinov⁵

^{1,2,3,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ lanqtada@gmail.com

Abstract. This paper presents the compressor blade algorithm for predicting the defect influence on the characteristics of the stage, axial compressor or GTU as a whole. Based on the description of the topology of the blade profile geometry, an algorithm for constructing the flow path of an axial compressor using the introduction of local defects and changes in the blade apparatus has been developed to solve the problems of accounting for changes in the operation of turbomachines.

Keywords: gas turbine, axial compressor, blade apparatus, blade defects, geometric deviations, mathematical description

В настоящее время газотурбинные установки (ГТУ) находят широкое применение в различных отраслях производств. Одним из важных конструктивных элементов таких установок является осевой компрессор (ОК), лопаточный аппарат (ЛА) которого в ходе эксплуатации подвержен воздействию таких негативных факторов, как эрозийный и коррозионный износ, загрязнение проточной части и попадание различных предметов и частиц, вызывающих повреждения поверхностей лопаток.

Зачастую осуществлять замену дефектного лопаточного аппарата на новый экономически невыгодно, поэтому прибегают к ремонту таких лопаток или к их замене на лопатки, имеющие менее значимые дефекты, после чего компрессор вновь вводят в эксплуатацию. Введение математического аппарата, описанного в статье «Анализ влияния отклонений в геометрии лопаточного аппарата осевого компрессора на характеристики газотурбинной установки» [1], позволяет учесть влияние дефектов ЛА и отразить их на изменении основных параметрах ОК и ГТУ.

Разработанный алгоритм исследования влияния дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора на газотурбинную установку в целом представлен на рис. 1. Алгоритм можно условно разделить на четыре этапа, которые отмечены на рисунке римскими цифрами.

Методология проведения оценки технического состояния начинается со сбора сведений об осевых компрессорах и видах дефектов его лопаточного аппарата [1–3], посредством проработки технической литературы, изучения результатов испытаний и других экспериментальных данных.

На втором этапе с помощью специально разработанной математической модели, основанной на применении основных геометрических параметров лопаточного профиля [1; 3], происходит создание геометрии модели бездефектного ЛА и формирование расчетной модели в любой САЕ системе. Это позволяет выполнить расчет лопатки с определением исследуемых газодинамических параметров (КПД, расхода, потерь давления и т. д.), а также прочностных характеристик. Стоит отметить сложность в построении точной модели лопатки чисто математическими методами, именно поэтому для повышения точности необходима верификация получаемых профилей.

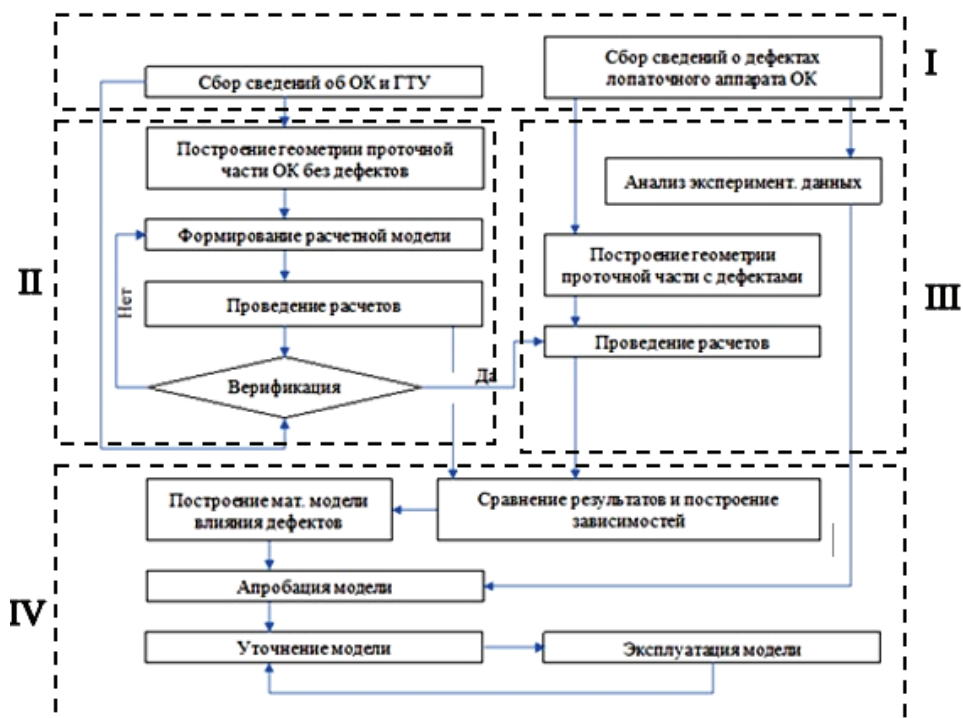


Рис. 1. Алгоритм формирования модели учета влияние дефектов

Если результаты верификации позволяют с достаточной точностью сопоставить численную модель с реальной, то ее можно применить для расчетов ОК с дефектами. При наличии значительных расхождений в сравнении расчетных данных с собранными данными о компрессоре повторяются предыдущие шаги в целях доводки численной модели.

После верификации проводится внесение исследуемых дефектов в лопаточный аппарат ОК. Задание дефектов может происходить вручную в определенной части профиля или путем изменения координаты сразу нескольких точек, регулируя положение управляющих точек кривой Безье [1; 4]. После внесения дефектов выполняется расчет, целью которого является сбор данных о прочности лопаток и характере течения в межлопаточных каналах ОК.

Построение зависимостей по собранным данным позволяет провести количественный и качественный анализы о влиянии каждого типа дефектов на проточную часть ОК, после чего происходит построение математической модели прогнозтики.

Одним из заключительных шагов является апробация модели, под которой понимается сверка результатов реальных испытаний дефектного ЛА ОК с результатами, полученными в ходе расчета. Модель уточняется и отправляется в эксплуатацию, в ходе которой она также дополнительно изучается и по необходимости уточняется.

Путем развития такого метода исследования лопаток может являться модернизация расчетов в сторону расширения номенклатуры исследуемых профилей и учета большего количества типов дефектов. В настоящее время выполнены I, II и III этапы, в качестве дальнейшего развития работы можно считать расширение исследования, а также проработку IV этапа.

Представленный алгоритм для исследования лопаток осевого компрессора может найти применение на предприятиях, эксплуатирующих и ремонтирующих такой тип лопаточных машин, поскольку алгоритм позволит проводить обоснованную комплектацию проточной части лопатками, содержащими различные дефекты, что в перспективе поможет снизить издержки предприятия.

Список источников

1. Блинов В. Л., Зубков И. С. Анализ влияния отклонений в геометрии лопаточного аппарата осевого компрессора на характеристики газотурбинной установки // Современные проблемы теплофизики и энергетики : материалы III международ. конф., 19–23 окт. 2020 г. М. : Изд-во МЭИ, 2020. С. 481–482.
2. Налимов Ю. С. Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей // Металл и Литье Украины. 2014. № 12 (259). С. 17–22.
3. Ревзин Б. С. Осевые компрессоры газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. Екатеринбург : УГТУ, 2000. 90 с.
4. Jaiswal S. Shape parametrization of airfoil shapes using Bezier curves [Electronic resource] // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. 2017. P. 79–85. DOI: 10.1007/978-981-10-1771-1_13 (date of access: 11.11.2020).

УДК 62-665.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КОТЛАХ ТЭЦ ММК

И. Ю. Зыкин¹, М. С. Соколова²

^{1,2} Магнитогорский государственный технический университет
имени Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

² margo88k2017@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена возможность использования водоугольного топлива взамен пылеугольного в энергетических котлах тепловой энергостанции Магнитогорского металлургического комбината (ТЭЦ ММК). Представлена экономическая оценка предлагаемого мероприятия по замене топлива.

Ключевые слова: паровой котел, водоугольное топливо, пылеугольное топливо

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING WATER-COAL FUEL IN THE BOILERS OF THE HEATING CENTER OF PJSC «MAGNITOGORSK IRON AND STEEL WORKS»

I. Yu. Zykin¹, M. S. Sokolova²

^{1,2} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² margo88k2017@mail.ru

Abstract. The article discusses the possibility of using coal-water fuel instead of pulverized coal in power boilers of the combined heat and power plant of PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works». An economic assessment of the proposed fuel change action is presented.

Keywords: steam boiler, coal-water fuel, pulverized coal fuel

В настоящее время на металлургических предприятиях полного цикла актуальной остается задача по сокращению затрат на покупку дорогостоящего горючего топлива. Одним из вариантов явля-

ется замена используемого так называемого классического топлива (природный газ, пылеугольное топливо, мазут) на альтернативные варианты.

Сегодня в котельном участке тепловой энергостанции Магнитогорского металлургического комбината (ТЭЦ ММК) используются два вида топлива (природный газ и уголь), каждый из которых имеет ряд недостатков:

- 1) при сжигании угля происходит шлакование топки котла, а также образуется большое количество вредных выбросов в атмосферу;
- 2) природный газ может быть взрывоопасен, а также требует строительства разветвленной системы газоснабжения на предприятии;
- 3) цены на природный газ и угольное топливо непрерывно растут.

Водоугольное топливо (ВУТ) — жидкое топливо, которое получают путем смешивания измельченного угля (60–70 %), воды (29–39 %) и пластификатора (1 %).

Для водоугольного топлива характерны следующие свойства [1]:

- 1) температура воспламенения — 800–850 °С;
- 2) температура горения — 950–1150 °С;
- 3) теплотворная способность — 3700–4700 ккал/кг (15,5–19,7 МДж/кг);
- 4) степень сгорания углерода — более 99 %.

Водоугольное топливо обладает следующими достоинствами:

1) сжигание угля в форме ВУТ снижает выбросы оксидов азота по сравнению со сжиганием угля на 35–40 %;

2) механический недожог угля в составе ВУТ составляет не более 1 %, что исключает выбросы шлака в атмосферу;

3) температурный режим горения ВУТ снижает шлакование котла на 30–50 %, характерное для пылеугольного сжигания;

4) экологически безопасное топливо на всех стадиях производства и использования, при случайных разливах не наносит ущерб окружающей среде, пожаро- и взрывобезопасен;

5) зола от сжигания ВУТ содержит не более 3 % недожженного углерода и может использоваться в качестве наполнителя бетонов.

Процесс производства водоугольного топлива состоит из трех основных этапов (рис. 1) [2; 3]:

1) предварительное дробление до размера фракции 3–12 мм. При использовании в качестве сырья угольного шлама с мелкими фракциями данную стадию можно исключить;

2) мокрый помол в шаровых мельницах до фракции $< 3\text{--}150$ мкм. Настоящая стадия производства ВУТ является ключевой, т. к. от качества и тонины помола зависят дальнейшие характеристики ВУТ (вязкость и стабильность);

3) гомогенизация. На этой стадии устраняются неравномерности распределения частиц угля внутри суспензии, добавляются пластификаторы и стабилизаторы. На третьей стадии ВУТ приобретает необходимые гомогенные свойства.

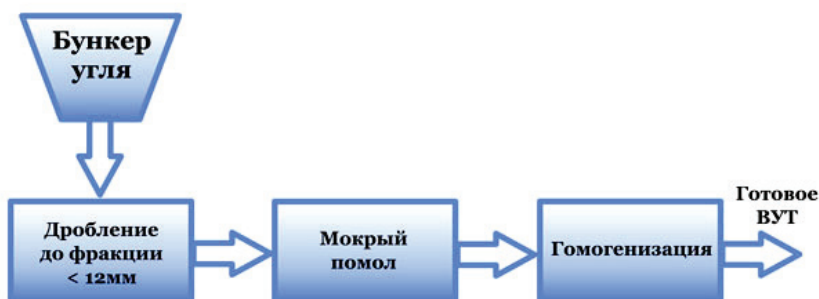


Рис. 1. Этапы производства водоугольного топлива

Стоит отметить, что в 2009 г. впервые было реализовано устройство, в котором этапы мокрого помола и гомогенизации объединены и осуществляются одновременно (гидроударный узел мокрого помола, ГУУМП).

На рис. 2 представлены усредненные цены (по состоянию на 2019 г.) различных видов топлива (за 1 Гкал).

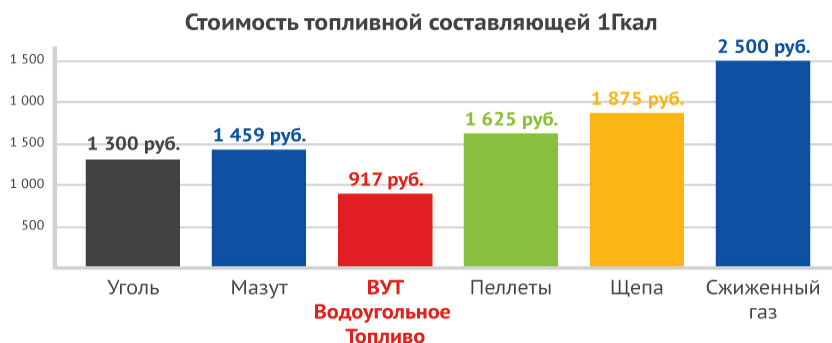


Рис. 2. Стоимость различных видов топлива (за 1 Гкал)

По данным ТЭЦ ММК за 2018 г. на котлах станции было использовано 30275 т угля с калорийностью 4855 ккал/кг. Затраты на покупку угля составили ориентировочно 56 млн р.

Общее время работы мельничного вентилятора и шаровых мельниц в 2018 г. составило 1500 ч. Потребление электроэнергии каждым из этих устройств составляет 320 и 430 кВт·ч соответственно.

В случае замены пылеугольного топлива на водоугольное и при использовании ГУУМП появляется возможность отказа от работы мельничного вентилятора и шаровых мельниц, что позволит сэкономить порядка 1125 тыс. (кВт · ч)/год. При стоимости электроэнергии 2,67 р./(кВт · ч) экономия составит около 3 млн р./г. При этом затраты на модернизацию котельных агрегатов, установку оборудования для приготовления ВУТ, организацию инфраструктуры подачи ВУТ, а также замену горелок составляет порядка 90 млн р.

Таким образом, срок окупаемости предлагаемого мероприятия с учетом экономии затрат на топливо, сокращения потребления электроэнергии и предварительной оценкой затрат на модернизацию станции составляет порядка 1,53 года.

Список источников

1. Долинский А. А., Халатов А. А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // Промышленная теплотехника. Т. 29, № 5. С. 70–79.
2. Зайденварг В. Е., Кондратьев А. С., Мурко В. И. Водоугольное топливо, трубопроводное транспортирование и сжигание на теплоэлектростанциях // Уголь. 2019. № 9. С. 76–80.
3. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции / М. А. Курганкина [и др.] // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 9. С. 72–82.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Э.Э. Кабисова¹, К.А. Габараев², Б.В. Заоев³, М.Т. Плиева⁴

^{1,2,3,4} Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

¹ madosya80@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы определения статистических характеристики и коэффициентов в режимах электропотребления. Приведены основные расчеты статистических коэффициентов электропотребления и характеристик электрической нагрузки. Представленные результаты могут быть использованы для расчетов и улучшения режимов электропотребления; проведения оптимизационных расчетов.

Ключевые слова: нагрев, нагрузка, коэффициент, электропотребление

ANALYSIS OF STATISTICAL STUDY OF ELECTRIC LOADS

E. E. Kabisova¹, K. A. Gabaraev², B. V. Zaoev³, M. T. Plieva⁴

^{1,2,3,4} North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), Vladikavkaz, Russia

¹ madosya80@mail.ru

Abstract. The paper discusses the issues of determining the statistical characteristics and coefficients in the modes of power consumption. The basic calculations of the statistical coefficients of power consumption and characteristics of the electrical load are presented. The presented results can be used for calculations and improvement of power consumption modes; optimization calculations.

Keywords: heating, load, coefficient, power consumption

Электрическая нагрузка в силу многообразия действующих факторов является случайной величиной, а ее изменение во времени является случайным процессом.

Статистические характеристики случайного процесса I_t или P_t и Q_t определяются множеством технологических факторов (объемом выпускаемой продукции, производительностью оборудования, временем работы и т. д.) [1–4].

Получение обоснованных по точности статистических характеристик электропотребления позволяет рассчитать ряд статистических коэффициентов электропотребления и характеристик электрической нагрузки:

Среднее значение:

$$1) \text{ мощности — } \bar{P}_{\text{cp}} = M[P] = \frac{\sum P_i}{n};$$

$$2) \text{ тока нагрузки — } \bar{I}_{\text{cp}} = M[I] = \frac{\sum I_i}{n},$$

где n — размер статистического массива.

Среднеквадратичные отклонения:

$$1) \text{ мощности — } \bar{\sigma}_{\text{cp}, P} = \sqrt{\bar{D}_P} = \frac{n}{n-1} \sqrt{\frac{\sum P_i^2}{n} - (\bar{P}_{\text{cp}})^2};$$

$$2) \text{ тока нагрузки — } \bar{\sigma}_{\text{cp}, I} = \sqrt{\bar{D}_I} = \frac{n}{n-1} \sqrt{\frac{\sum I_i^2}{n} - (\bar{I}_{\text{cp}})^2}.$$

Расчетные значения нагрузки при заданной доверительной вероятности:

$$1) \text{ мощности — } \bar{P}_p = \bar{P}_{\text{cp}} + t_{\beta} \bar{\sigma}_P;$$

$$2) \text{ тока нагрузки — } \bar{I}_p = \bar{I}_{\text{cp}} + t_{\beta} \bar{\sigma}_I.$$

Полученные значения средних нагрузок \bar{P}_{cp} и \bar{I}_{cp} , расчетных нагрузок \bar{P}_p и \bar{I}_p , а также имеющиеся сведения об установленной мощности электрооборудования — P_n и соответствующего ей тока:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n}$$

позволяют рассчитывать некоторые статистические коэффициенты электропотребления.

Коэффициент использования:

$$1) \text{ по мощности — } K_{\text{н}P} = \frac{\bar{P}_{\text{cp}}}{P_n};$$

$$2) \text{ току — } K_{нI} = \frac{\bar{I}_{\text{ср}}}{I_{\text{н}}}.$$

Коэффициент спроса:

$$1) \text{ по мощности — } K_{\text{ср}P} = \frac{\bar{P}_{\text{р}}}{P_{\text{н}}};$$

$$2) \text{ току — } K_{\text{ср}I} = \frac{\bar{I}_{\text{р}}}{I_{\text{н}}}.$$

Коэффициент максимума нагрузки:

$$1) \text{ по мощности — } K_{\text{м}P} = \frac{\bar{P}_{\text{р}}}{\bar{P}_{\text{ср}}};$$

$$2) \text{ току — } K_{\text{м}I} = \frac{\bar{I}_{\text{р}}}{\bar{I}_{\text{ср}}}.$$

Коэффициент формы графика нагрузки:

$$1) \text{ по мощности — } K_{\text{ср}P} = \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{\sigma}_P}{\bar{P}_{\text{ср}}} \right)^2};$$

$$2) \text{ току — } K_{\text{ср}I} = \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{\sigma}_I}{\bar{I}_{\text{ср}}} \right)^2}.$$

Кроме того, возможно определение:

$$1) \text{ полной расчетной нагрузки — } \bar{S}_{\text{р}} = \sqrt{3} U_{\text{н}} \bar{I}_{\text{р}};$$

$$2) \text{ годового числа часов максимума активной мощности — } T_{\text{ма}} = \frac{W_{\text{г}}}{\bar{P}_{\text{р}}};$$

$$3) \text{ годового числа часов максимума потерь в электрических сетях — } \tau_{\text{м}} = \left(0,124 + \frac{T_{\text{ма}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760;$$

$$4) \text{ годового коэффициента сменности по энергоиспользованию — } \alpha = \frac{W_{\text{г}}}{\bar{P}_{\text{ср}} T_{\text{г}}};$$

5) отношения максимума нагрузки \bar{P}_p к наибольшей нагрузке в часах максимума энергосистемы \bar{P}_{mf} (коэффициента неравномерности графика нагрузки) — $K_n = \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_{mf}}$, что позволяет рассчитать стоимость теряемой электроэнергии в электрических сетях по соотношению:

$$C = \delta(\alpha K_n + \beta \tau_n),$$

где δ — коэффициент, учитывающий затраты на расширение электрических сетей, обусловленные передачей мощности для покрытия потерь активной мощности:

$$\delta = 1 + 0,02 \cdot \Delta \Theta,$$

где $\Delta \Theta$ — сумма потерь электроэнергии в процентах от электроэнергии, передаваемой по сетям от электростанции системы к объекту; α — удельные затраты на покрытие потерь активной мощности, р./кВт; β — удельные затраты на выработку электроэнергии, р./(кВт · ч).

В процессе анализа режима электропотребления были установлены величины оценки коэффициентов использования максимума, спроса, а также формы графика нагрузки по активной мощности с доверительной вероятностью 0,9 и точностью 10 %; полученные статистические характеристики и коэффициенты режима электропотребления могут быть использованы для расчетов режимов электропотребления; улучшения режимов электропотребления; проведения оптимизационных расчетов, позволяющих рекомендовать на каждом этапе развития работ наиболее рациональную схему электроснабжения предприятий, а также сечения питающих и распределительных линий.

Список источников

1. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М. : НЦ ЭНАС, 2005. 280 с.
2. Шевченко Н. Ю., Лебедева Ю. В., Угаров Г. Г. Повышение эффективности работы воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных метеоусловиях // Вестник СГТУ. 2011. № 1. С. 119–123.
3. Гаврина О. А., Плиева М. Т., Маскуров И. В. Использование статистического метода расчета потерь электроэнергии // Культура, на-

ука, образование: проблемы и перспективы : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, Нижневартовск, 12 нояб. 2019 г. Нижневартовск : НВГУ, 2019. С. 659–662.

4. Plieva M., Kabisov A., Gudiev T. Analysis of ambient temperature influence on operation of overhead power lines [Electronic resource] // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020: Proceedings. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112005 (date of access: 15.11.2020).

УДК 532.5

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ БИТУМА

Р. З. Касимов¹, А. А. Лебедева², Д. Н. Попов³

^{1,2,3} Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

¹ te@istu.ru

Аннотация. В работе представлена методика численного моделирования процесса разогрева битума с переводом его в характерное жидкое состояние, когда наблюдаются конвективные потоки среды. Математическая модель процесса сформулирована на основе двухфазной задачи Стефана с привлечением уравнений, определяющих свободное движение частиц в расплаве. Приведены результаты расчетов и выводы.

Ключевые слова: установки для размягчения битума, задача Стефана, межфазная граница, математическое моделирование

ON ONE APPROACH TO THE CALCULATION OF THE BITUMEN MELTING PROCESS

R. Z. Kasimov¹, A. A. Lebedeva², D. N. Popov³

^{1,2,3} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

¹ te@istu.ru

Abstract. The paper presents a technique for numerical modeling of the process of heating bitumen with its transfer to a characteristic liquid state, when convective flows of the medium are observed. The mathematical model of the process is formulated on the basis of the two-phase Stefan problem with the use of equations that determine the free motion of particles in the melt. The calculation results and conclusions are presented.

Keywords: installations for softening bitumen, Stephan's problem, interface, mathematical modeling

Несмотря на то что битум относится к аморфным материалам, общепринято называть установки для подогрева и размягчения битума

битумоплавильными [1; 2]. В настоящее время такие установки имеют различные конструкции, модификации и оснащаются разнообразными техническими средствами: горелками, теплообменниками, мешалками и др. Интенсивность протекания процессов и энергоэффективность здесь зависят от ряда факторов, основными из которых являются:

- 1) производительность и, соответственно, объем рабочей емкости;
- 2) расположение в объеме нагревательных элементов или иных поверхностей теплообмена;
- 3) степень влияния внешних условий, особенно температуры наружного воздуха в холодный период времени года.

Широкое распространение получили плавильные установки с косвенным нагревом, нижним расположением теплообменника и боковой подачей битума, обладающие высокой надежностью.

Для моделирования процессов теплообмена, сопровождающихся фазовыми переходами, повсеместно используется методология задачи Стефана [3]. Ее суть заключается в том, что расчетная область в определенный момент времени может содержать объемы, заполненные твердым веществом и жидкостью (расплавом) и претерпевающие тепловые воздействия. Межфазная граница здесь изменяет свое положение под воздействием тепловых потоков и конвективных течений в расплаве.

Математическая модель, представленная системой дифференциальных соотношений, записанных в полярных координатах (Θ, r) , включает в себя:

- 1) уравнение теплопроводности для твердой фазы;
- 2) уравнение теплопроводности для жидкой фазы;
- 3) уравнение переноса завихренности в области расплава;
- 4) уравнение Пуассона для функции тока в области расплава;
- 5) уравнения для проекций скоростей в области расплава.

Система уравнений дополняется начальными и граничными условиями, среди которых особого внимания заслуживают условия на межфазной поверхности S :

$$\left\{ \begin{array}{l} [T] = 0 \text{ или } T_1 = T_2 = T^* \\ \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right] = Q_\Phi \bar{\rho} V_n \text{ или } \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = Q_\Phi \bar{\rho} V_n, \end{array} \right.$$

где Q_Φ — теплота фазового перехода; $\bar{\rho}$ — осредненная плотность двухфазной системы; V_n — скорость движения межфазной границы по нормали к ней.

Результаты расчетов представлены на рис. 1.

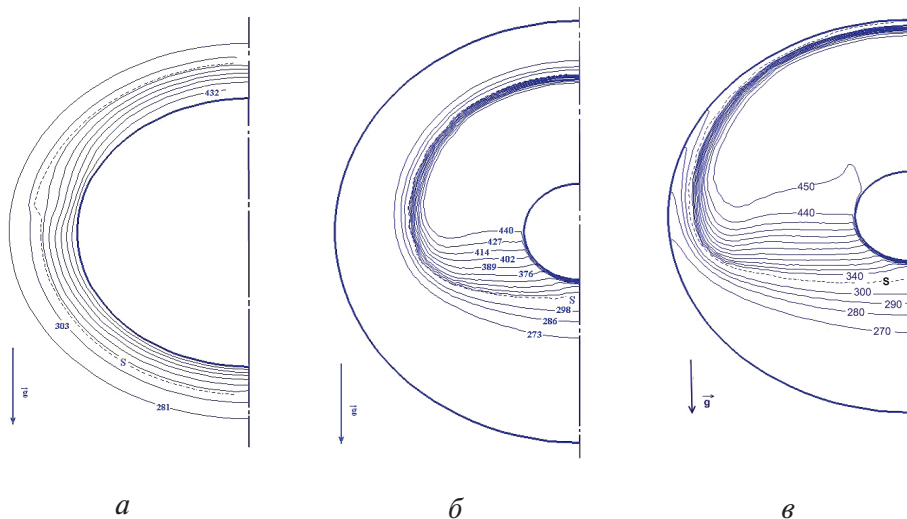


Рис. 1. Распределение температур и положение межфазной границы (штриховая линия) в моменты времени:
 $a - \tau = 130$ с; $b - \tau = 1000$ с; $v - \tau = 2200$ с

На начальном этапе изотермы и линия S , представляющая собой образующую межфазной поверхности, имеют вид концентрических окружностей. Толщина области расплава незначительна и, таким образом, не способствует развитию конвективных течений. В определенный момент времени происходит отрыв потока от поверхности трубы на уровне $\Theta = \pi$ и деформация изотерм и межфазной поверхности (рис. 1, a).

Область расплава, показанная на рис. 1, b , вполне достаточна для эволюции конвективных течений и вихреобразования. Частицы жидкости, поднимаясь от верха трубы, попадают в холодную зону у межфазной границы, приобретают более низкую температуру и опускаются, подходя к нижней половине трубы.

Развитие процесса во времени интенсифицирует теплообмен и приводит к повышению скорости жидких частиц. На рис. 1, v продемонстрирована последняя из возможных картин теплообмена, поскольку поверхность S достигла внешней границы расчетной области и возникает необходимость замены граничных условий для параметров жидкой фазы.

Ортогональные сетки представлены на рис. 2.

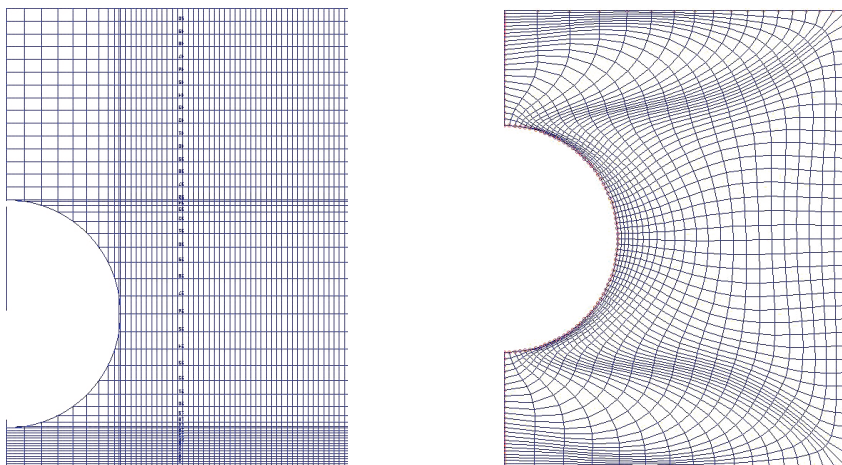


Рис. 2. Возможные варианты сеточных областей для расчета процессов плавления

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- 1) разработана и численно реализована математическая модель плавления битумных вяжущих в форме двухфазной задачи Стефана, дополненной блоком расчета свободной конвекции в области жидкой фазы с переменной вязкостью;
- 2) подход к реализации граничных условий на межфазной границе, предложенный Д. Н. Поповым, В. Н. Диденко и Р. З. Касимовым [4], в очередной раз показал свою эффективность;
- 3) используемая в модели полярная система координат имеет определенные ограничения, в частности, касающиеся допустимого расположения внешней границы расчетной области. Имеются необходимые предпосылки для использования в дальнейших исследованиях ортогональных сеток, представленных на рис. 2.

Список источников

1. Гун Р. Б. Нефтяные битумы. М. : Химия, 1973. 432 с.
2. Голдина В. Д. Серобитумные вяжущие. Омск : СибАДИ, 2011. 124 с.
3. Самарский А. А., Вабишевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : URSS, 2003. 784 с.
4. Попов Д. Н., Диденко В. Н., Касимов Р. З. Методика численного моделирования фазовых переходов теплоаккумулирующих материалов, заключенных в двумерный объем // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1 (25). С. 26–30.

УДК 681.332

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО КРИОГЕНЕРАТОРА НА ОБЪЕКТАХ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Г. Г. Кикнавелидзе¹, Н. В. Колпакова²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ gia52@me.com

Аннотация. В статье кратко описано устройство волнового криогенератора (ВКГ), а также принцип его работы. Представлено описание термодинамических процессов, протекающих в ВКГ, с диаграммой рабочего цикла.

Ключевые слова: волновой криогенератор, энерговыделение, эффект Гар-тмана — Шпренгера, аэротермоакустический эффект

POSSIBILITY OF USING A WAVE CRYOGENERATOR AT HEAT AND GAS SUPPLY FACILITIES

G. G. Kiknavelidze¹, N. V. Kolpakova²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ gia52@me.com

Abstract. The article briefly describes the structure of the wave cryogenerator (WCG), as well as the principle of its operation. There is also a description of the thermodynamic processes occurring in the WCG with a diagram of the working cycle.

Keywords: wave cryogenerator, energy release, Hartmann — Sprenger effect, aerothermoacoustic effect

Волновой криогенератор (ВКГ) представляет собой устройство для безмашинного охлаждения, которое в отличие от дроссельных устройств имеет большую термодинамическую эффективность, поскольку процесс в них протекает с изменением энтальпии. Иными

словами, газ совершает работу, в результате которой на выходе имеется охлажденный поток газа с пониженной энтальпией, а также происходит выделение теплоты в самом ВКГ, которую можно утилизировать и использовать для различных нужд, например в теплогазоснабжении.

Основой работы такого устройства является аэротермоакустический эффект Гартмана — Шпренгера. Суть его заключается в том, что при работе ВКГ происходит выделение тепловой и акустической энергии за счет появляющихся упругих колебаний в устройстве.

ВКГ имеет изменяемую геометрию проточной части, а также допускает регулировку расстояния между соплом и резонансной трубкой.

Конструкция ВКГ состоит из следующих элементов (рис. 1):

1 — патрубок входа сжатого газа; 2 — подвижный канал, который обеспечивает подвод газа к соплу 4; 3 — отверстия в канале, обеспечивающие подачу газа в него; 4 — сопло; 5 — игла, соосная соплу; 6 — конический участок центрального штока; 7 — центрирующий узел штока; 8 — регулятор сечения сопла; 9 — регулятор зазора между соплом и трубкой; 10 — начальный участок резонансной трубки; 11 — резонансная трубка; 12 — выход холодного потока.

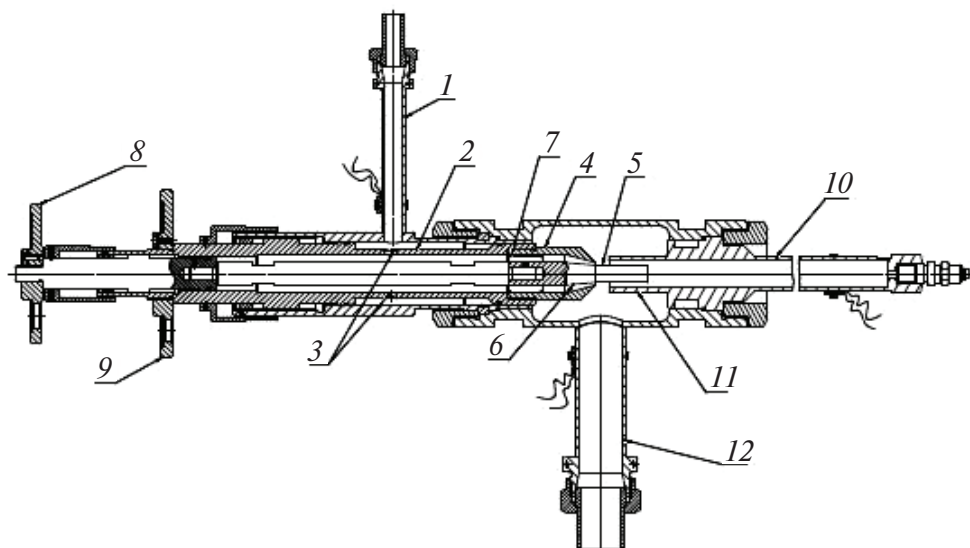


Рис. 1. Схема ВКГ-30-6-165000

В общем виде описание процессов, происходящих в ВКГ, может быть представлено следующим образом (рис. 2) [1]:

- процесс 1–2 — адиабатическое сжатие газа, поступающего в резонансную трубку, до определенного давления P_0 ;
- процесс 2–3 — отвод тепла в окружающую среду (либо внешним теплоносителем) при давлении P_0 ; газ охлаждается до температуры $T_{o.c.}$;
- процесс 3–4 — адиабатическое расширение газа до давления P_a . В ходе этого процесса происходит «выталкивание» из трубки газа, который успел в нее попасть (появляется ударная волна);
- процесс 4–1 — подвод тепла от окружающей среды или внешнего теплоносителя. Происходит нагрев оставшегося газа до температуры $T_{o.c.}$.

Таким образом, ВКГ можно представить в виде устройства, в котором осуществляется процесс адиабатического расширения газа с совершением работы, преобразующейся в тепловую энергию и акустическое излучение. ВКГ — это акустико-тепловой преобразователь, т. е. поглотитель волновой энергии, дающий возможность превращать излучаемую генератором волновую энергию в теплоту на температурном уровне больше, чем температура окружающей среды [1].

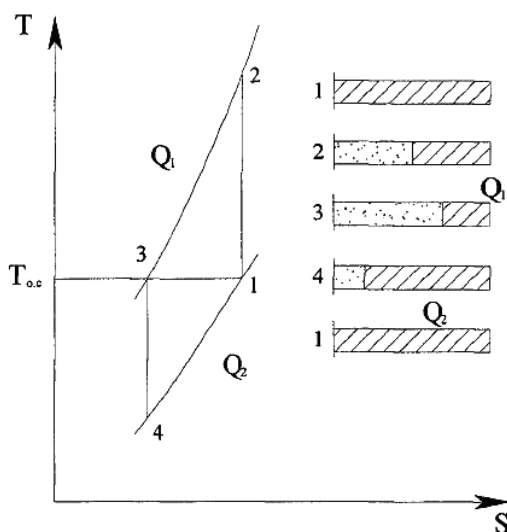


Рис. 2. Термодинамические процессы в ВКГ

По мнению ряда разработчиков, ВКГ, являясь безмашинными аппаратами, занимают особое место в числе охладителей, использую-

щих энергию сжатого газа, и имеют неоспоримые эксплуатационные и конструктивные преимущества — высокую надежность, многофункциональность, безынерционность, компактность, простоту изготовления [2]. ВКГ рассматриваются как фактор повышения энергетической эффективности установок очистки и разделения газовых смесей [3].

Список источников

1. Бондаренко В.Л. Создание и исследование волновых криогенераторов и их применение в технологии получения неона высокой чистоты: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.03 / Бондаренко Виталий Леонидович. М., 2003. 294 с.
2. Бондаренко В.Л., Лосяков Н.П., Симоненко Ю.М. Волновые криогенераторы в технологиях извлечения редких газов//Техн. газы. 2006. № 5. С. 24—31.
3. Газодинамические криогенераторы как фактор повышения энергетической эффективности установок предварительной очистки неоногелиевой смеси / В.Л. Бондаренко [и др.] // Изв. Санкт-Петербург. гос. ун-та низкотемператур. и пищевых технологий. 2009. № 1. С. 70—75.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СПЕКТРА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Д. А. Киргуев¹, Д. А. Кумсиев², А. Ф. Мисиков³, О. А. Гаврина⁴

^{1,2,3,4} Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

¹ kluev-roman@rambler.ru

Аннотация. В работе проведен анализ спектра тока и напряжения по высшим гармоническим составляющим основного технологического оборудования крупного металлургического предприятия.

Ключевые слова: потребители электроэнергии, спектр напряжений и токов, гармоники

ANALYSIS OF THE SPECTRUM OF CURRENTS AND VOLTAGES OF CONSUMERS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

D. A. Kirguyev¹, D. A. Kumsiev², A. F. Misikov³, O. A. Gavrina⁴

^{1,2,3,4} North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), Vladikavkaz, Russia

¹ kluev-roman@rambler.ru

Abstract. The paper analyzes the spectrum of current and voltage by the higher harmonic components of the main technological equipment of a large metallurgical enterprise.

Keywords: consumers of electricity, range of voltages and currents, harmonics

Высокий уровень конкуренции в сфере металлургического производства обуславливает повышенные требования к качеству электроэнергии, являющейся одной из основных составных частей всех циклов технологических процессов. По этой причине системы обеспечения качества электроснабжения должны функционировать таким образом, чтобы они были способны справиться с широким спектром

проблем, начиная от провалов, колебаний, выбросов напряжения, высокочастотных шумов, импульсных помех и заканчивая обеспечением электропитанием при полном отсутствии напряжения промышленной сети. Одну из таких проблем представляют искажения формы напряжения, вызванные гармоническими составляющими напряжения.

В связи с вышеизложенным, проблема исследования высших гармонических составляющих напряжения и уменьшения их негативного влияния, как на приемники электроэнергии, так и на питающую электрическую сеть, является весьма важной [1–5]. Так, для одного из крупнейших металлургических предприятий, решение этой проблемы представляет особую актуальность в связи с наличием на предприятии большого числа электроприемников, искажающих синусоидальную форму напряжения в сети. Основными потребителем электроэнергии рассматриваемого предприятия является электролизное производство (около 70 %). Питание электролизеров осуществляется от одиннадцати регулируемых 6-ти и 12-ти фазных вентильных преобразователей, которые и являются источниками высших гармоник. Кроме того, на предприятии имеются индукционные и дуговые шликерные печи, синхронные и асинхронные двигатели.

Измерение показателей КЭ проводились с помощью прибора ПКК-57 на главной понизительной подстанции (ГПП) и на цеховых подстанциях завода. Получены значения тока, напряжения, мощности, коэффициентов несинусоидальности по напряжению и току по выпрямительным агрегатам, индукционным и дуговым печам, двигателям. Так, по выпрямительному агрегату спектральный состав по току и напряжению представлен в таблице. Видно, что в выпрямительном агрегате появляются высшие гармоники по току (3), по напряжению (5, 7, 11, 13).

Таблица

Спектральный состав по току и напряжению выпрямительного агрегата

Номер гармони- ки, n	Спектральный состав				
	по току, $(\frac{I_n}{I_1}, \%)$			по напряжению, $(\frac{U_n}{U_1}, \%)$	
	Фаза A	Фаза B	Фаза C	U_{12}	U_{23}
1	100	100	100	100	100
3	—	—	—	—	—
5	24,88	24,44	25,86	1,09	1,02

Окончание табл.

Номер гармоники, n	Спектральный состав				
	по току, ($\frac{I_n}{I_1}, \%$)			по напряжению, ($\frac{U_n}{U_1}, \%$)	
	Фаза A	Фаза B	Фаза C	U_{12}	U_{23}
7	—	—	—	1,22	1,10
9	—	—	—	—	—
11	—	—	—	1,80	1,73
13	—	—	—	1,86	1,85

По индукционным печам измерения проведены при включенных и отключенных батареях статических конденсаторов (БСК). Результаты по индукционной печи приведены на рис. 1, 2.

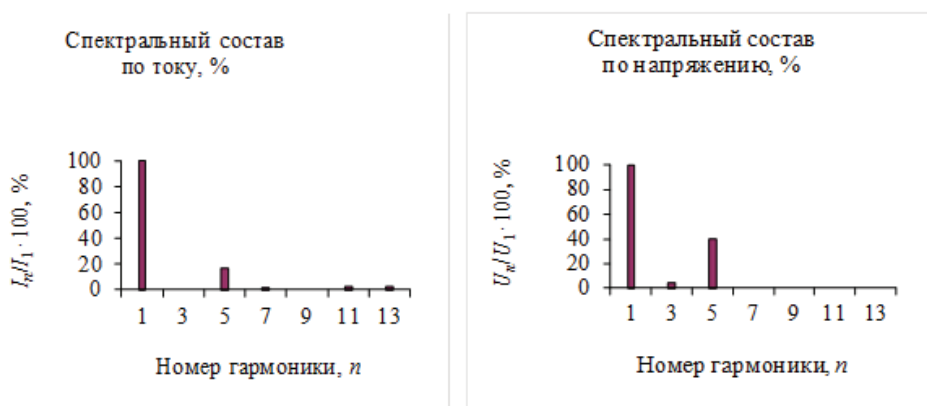


Рис. 1. Спектры токов и напряжений при включенных БСК



Рис. 2. Спектр напряжений при отключенных БСК

Из рис. 1, 2 видно, что при выключении БСК на индукционных печах возникают, помимо 3 и 5 гармоник по напряжению, 7, 11, 13, 17, 19 гармоники, процентное содержание которых составляет от 0,6 до 2,55 %. При включенных БСК процентное содержание 3 гармоники — 4,78 %, 5—40,22 %.

Список источников

1. Ранговый анализ высших гармонических составляющих по напряжению на предприятиях цветной металлургии / Р. В. Ключев [и др.] // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность: материалы науч. конф. Астрахань : Сорокин Р. В., 2020. С. 179—184.

2. Analysis of non-sinusoidal voltage at metallurgical enterprises [Electronic resource] / R. V. Klyuev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ETSaP. Tyumen : Tyumen industrial University, 2019. Vol. 663, № 1. № 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/663/1/012032 (date of access: 12.11.2020).

3. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Alborov A. D. Research of non-sinusoidal voltage in power supply system of metallurgical enterprises [Electronic resource] // Advances in Automation: Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8—14, 2019. Vol. 641. P. 393—400. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_42 (date of access: 12.11.2020).

4. Rank analysis of higher harmonics voltage spectrum of metallurgy enterprises [Electronic resource] / R. V. Klyuev [et al.] // Proceedings of the VIII Science and Technology Conference “Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus” (CIGGG 2018): Advances in Engineering Research, Essentuki, Russia, October 10—13, 2018. Vol. 182. AtlantisPress, 2018. P. 169—174. URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/ciggg-18/55915019> (date of access: 06.12.2020).

5. Experimental and analytical study of highest harmonic components of voltage of industrial enterprises [Electronic resource] / R. V. Klyuev [et al.] // Proceedings of the VIII Science and Technology Conference “Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus” (CIGGG 2018): Advances in Engineering Research, Essentuki, Russia, October 10—13, 2018. Vol. 182. AtlantisPress, 2018. P. 175—179. URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/ciggg-18/55915020> (date of access: 06.12.2020).

УДК 621.18

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА В РОССИИ И МИРЕ

В. А. Кирьянов¹, Н. В. Вальцев²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² nvaltsev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы разработок энергоблоков на ультрасверхкритические параметры пара, анализируются их преимущества и ограничения, рассматривается текущее состояние разработок в России.

Ключевые слова: ультрасверхкритические, КПД, жаропрочные сплавы

PROSPECTS FOR CREATION OF ULTRA-SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS POWER UNITS IN RUSSIA AND IN THE WORLD

V. A. Kiryanov¹, N. V. Valtsev²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² nvaltsev@mail.ru

Abstract. The article discusses the prospects for the development of power units for ultra-supercritical steam parameters, analyzes their advantages and limitations, and examines the current state of the development in Russia.

Keywords: ultra-supercritical, efficiency, high-temperature alloys

Во второй половине прошлого века в России на уровне лучших мировых образцов были созданы энергоблоки сверхкритического давления (СКД) с параметрами пара перед турбиной 24 МПа и 540 °С. На СССР и страны Варшавского договора приходилось 40 % от общемировой доли энергоблоков СКД [1]. Они продолжают эксплуатироваться, хотя во многом устарели. Так, КПД конденсацион-

ных пылеугольных энергоблоков России составляет 32–38 %, стран ЕС — 35–43 %. Кроме того, энергоблоки СКД выбрасывают в атмосферу значительный объем вредных веществ [2].

По мере вывода подобного генерирующего оборудования из эксплуатации оно должно заменяться новым, более современным и экологичным. И если газовые энергоблоки могут замещаться ПГУ, то для замены угольных важно заметно повысить их КПД, что может быть достигнуто благодаря совершенствованию тепловой схемы, основного и вспомогательного оборудования и, главное, повышению параметров пара перед турбиной. При повышении параметров пара со стандартных $p_0 = 25$ МПа, $t_0 = 545$ °С до $p_0 = 30$ МПа, $t_0 = 700$ °С КПД энергоблока увеличится примерно на 4,2 %. Оптимизация тепловой схемы и совершенствование основного и вспомогательного оборудования позволят повысить КПД еще на 2,4 % [2]. Не стоит забывать, что одновременно сократятся и удельные выбросы вредных веществ в атмосферу.

Максимальный достигнутый уровень параметров пара за котлом составляет 30 МПа и 600–620 °С, для увеличения t_0 до 700–750 °С необходимо использовать жаропрочные никелевые сплавы. Исследования возможностей создания энергоблоков на ультрасверхкритические параметры (УСКП) ведутся в разных странах мира (информация приведена в таблице).

Таблица

Проекты создания установок УСКП по странам [1]

Страна	Температура пара, °С	КПД нетто, %	Год начала программы	Год ввода демонстрационной установки	Мощность, МВт
ЕЭС	700	Более 50	1998	2021	500
США	760	45–47	2000	2021	600
Япония	700	Более 50	2008	2021	600
Китай	700	46–50	2011	2021	660
Индия	700	Более 50	2011	2020	800

Основные усилия направлены на разработку и испытания материалов для энергоблоков УСКП, в т. ч. в виде поверхностей нагрева в работающих котлах СКД. По результатам проектов рекомендованы к применению для высокотемпературных элементов сплавы: 263, 282, 617, 740, 740H.

Основная проблема при создании установок УСКП связана с чрезвычайно высокой стоимостью жаропрочных сплавов при умеренном выигрыше в эффективности энергоблока. Максимальная достижимая температура пара за котлом с применением сплава типа IN740 составляет порядка 750 °С, при этом стоимость подобных сплавов, по данным исследований, достигает 70 долл. за кг и выше при стоимости низколегированной стали — 2–3 долл. за кг, а аустенитной — 7–10 долл. за кг [3].

Сегодня работы по европейскому проекту AD-700 приостановлены. Причиной стала высокая стоимость, не оправдывающая повышение экономичности и снижение выбросов вредных веществ. Учитывая текущие тенденции в развитых странах по отказу от угольной энергетики и недавние заявления ведущих энергомашиностроительных корпораций по прекращению новых проектов строительства угольной генерации [4], можно сказать, что подобные энергоблоки, видимо, реализованы не будут. Судьба их в Китае и Индии пока представляется более оптимистичной.

В России, в свою очередь, с 2014 г. началась проработка проекта создания энергоблока на УСКП. Предложены несколько конструкций котлов для подобного энергоблока. На рис. 1 показаны проекты разработки ВТИ [2] и МЭИ [5].

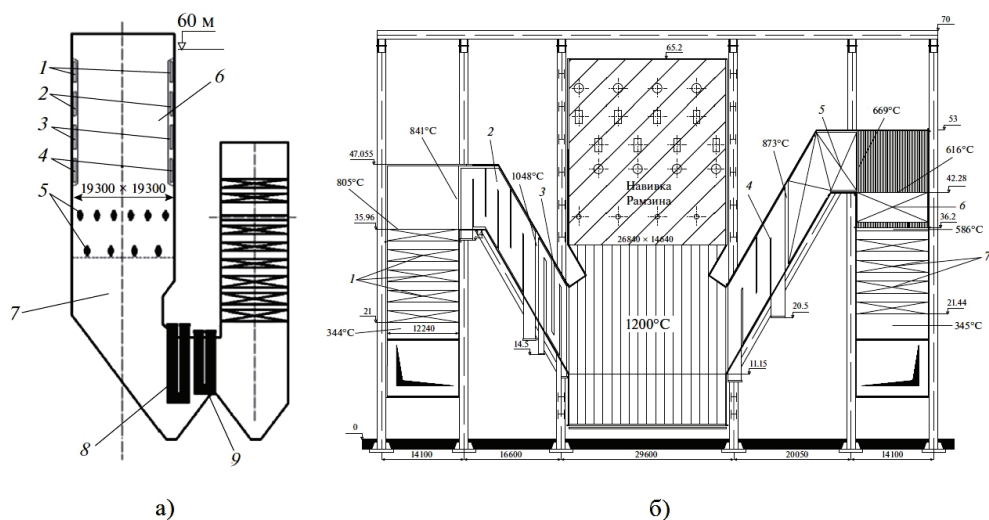


Рис. 1. Пылеугольные котлы на сверхкритические параметры пара:
а) по проекту ВТИ; б) по проекту МЭИ

В проекте учитываются как опыт разработки котла по проекту AD-700, так и отечественный опыт при создании энергоблока СКР-100 с параметрами пара 30 МПа и 650 °С. Благодаря этому в новом котле элементы пароперегревателя с температурой среды, равной 650 °С, предлагается сделать из стали марки ЭП-184, а выходные пакеты пароперегревателей — из сплава на основе никеля. Инвертная компоновка топки позволяет разместить коллекторы перегретого пара близко к паровпускным патрубкам турбины и сократить длину дорогих паропроводов из никелевых сплавов, устраняя таким образом главный недостаток европейского проекта котла.

Однако существенным ограничением создания подобного отечественного энергоблока является отсутствие жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для работ в подобных условиях. Единственной близкой разработкой является создание в 80-е гг. прошлого века сплава ХН55 МВЦ для проекта атомной установки с высокотемпературным газовым реактором.

В то же время толстостенные элементы типоразмером 152×26 мм, выполненные из стали ЭП-184, прошли проверку в течение 200 тыс. ч на установке 60-ОП ТЭЦ ВТИ и в течение 40 тыс. ч на энергоблоке СКР-100 Каширской ГРЭС и могут успешно использоваться при температуре пара перед турбиной до 650 °С. Перспективной является и сталь 10Х9К3В2 МФБР, находящаяся в стадии освоения [2]. Кроме того, в этом случае проблема сокращения длины дорогостоящих паропроводов становится неактуальной, и котел может быть выполнен традиционной компоновки.

По этой причине для дальнейшего развития и совершенствования отечественной угольной теплоэнергетики представляется целесообразным разработка угольного энергоблока на параметры пара 32 МПа, 650 °С, что позволит, опираясь на имеющиеся опыт и технологии, существенно повысить КПД без чрезмерных затрат.

Список источников

1. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants / ed. A. Di Gianfrancesco. Cambridge : Woodhead Publishing, 2017. 875 p.
2. Пылеугольные энергоблоки на супер- и ультрасверхкритические параметры пара: обзор / А. Г. Тумановский [и др.] // Теплоэнергетика. 2017. № 2. С. 3—19.

3. Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles / ed. K. Brun, P. Friedman, R. Dennis. Cambridge : Woodhead Publishing, 2017. 422 p.

4. Proctor D. Siemens, Toshiba Pulling Out of Coal-Fired Generation [Electronic resource]. URL: <https://www.powermag.com/siemens-toshiba-pulling-out-of-coal-fired-generation/> (date of access: 03.12.2020).

5. Прохоров В. Б., Чернов С. Л., Киричков В. С. Разработка схемы ступенчатого сжигания угля в инверторной топке энергоблока мощностью 1000 МВт // Теплоэнергетика. 2017. № 9. С. 58–63.

УДК 697.34

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕССИОННОГО СОГЛАШЕНИЯ В ИЖЕВСКЕ

И. А. Кокулин¹, А. Е. Барочкин²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

¹ ilya.kokulin@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты внедрения концессионного соглашения в Ижевске, а также проанализированы его положительные эффекты. Рассмотрено текущее состояние системы теплоснабжения. Рассчитаны показатели надежности и энергетической эффективности системы теплоснабжения Ижевска за 2017–2019 гг.

Ключевые слова: система теплоснабжения, безаварийный режим, тепловая сеть, концессионное соглашение, внедрение, реконструкция, энергоэффективность, надежность, надежность

RESULTS OF IMPLEMENTATION OF THE CONCESSION AGREEMENT IN IZHEVSK

I. A. Kokulin¹, A. E. Barochkin²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

¹ ilya.kokulin@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of the implementation of the concession agreement in Izhevsk. Positive effects are analyzed. The current state of the heat supply system is considered. Indicators of reliability and energy efficiency of the Izhevsk heat supply system for 2017–2019 are calculated.

Keywords: heat supply system, accident-free mode, heat network, concession agreement, implementation, reconstruction, energy efficiency, reliability

Основной проблемой при организации надежного централизованного теплоснабжения потребителей в большинстве городов является старение тепловых сетей и, как следствие, увеличение количества повреждений в отопительный период. Главной причиной такой

ситуации является недофинансирование теплоснабжающими и тепло-сетевыми организациями мероприятий по реконструкции тепловых сетей с превышенным сроком эксплуатации. При существующем методе регулирования тарифов объема финансирования инвестиционной программы недостаточно для поддержания системы теплоснабжения крупных городов в состоянии, обеспечивающим безаварийный режим работы или приведения тепловых сетей в нормативное состояние. В этих условиях заключение концессионного соглашения позволяет привлечь дополнительные источники финансирования.

Результаты внедрения концессии рассматриваются на примере Ижевска. Между ООО «УКС» и администрацией города 19 декабря 2016 г. было заключено концессионное соглашение № 1 сроком на 16 лет, по которому концессионер (ООО «УКС») обязуется за свой счет реконструировать объекты теплоснабжения Ижевска в целях обеспечения надежного теплоснабжения потребителей [1; 2].

В результате объем финансирования мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению ЦТП, насосных станций и тепловых сетей, представленный в табл. 1, вырос в 3 раза с 122,2 млн р. в 2016 г. до почти 400 млн р. в 2019 г.

Таблица 1

Объем финансирования мероприятий за 2017–2019 гг.
согласно концессионному соглашению № 1

Наименование мероприятия	Объем финансирования по годам в ценах текущего года, млн р. (без НДС)		
	2017	2018	2019
Мероприятия по техническому перевооружению сетей теплоснабжения	104,34	325,40	237,82
Мероприятия по реконструкции и техническому перевооружению ЦТП и насосных станций	17,82	87,61	145,24
Итог по всем мероприятиям	122,16	413,01	383,06

Основываясь на полученных данных посуточного отпуска тепла, подробного отчета о количестве аварийных ситуаций на квартальных тепловых сетях Ижевска, находящихся в обслуживании ООО «УКС», и времени их устранения на тепловых сетях, был произведен расчет показателей надежности и энергетической эффективности за период 2017–2019 гг., результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели надежности и энергетической эффективности за 2017–2019 гг. в рамках выполненных мероприятий по концессионному соглашению № 1

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя		
		2017	2018	2019
Количество прекращений подачи тепловой энергии, теплоносителя в результате технологических нарушений на тепловых сетях на 1 км тепловых сетей в год	ед./км	2,90	2,83	2,74
Отношение величины фактических технологических потерь тепловой энергии, теплоносителя к материальной характеристике тепловой сети	Гкал/м ²	6,43	6,34	6,24
Величина фактических технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя по тепловым сетям	тыс. Гкал/год	822,91	811,62	798,69

Основным положительным эффектом от внедрения концессии следует считать резкое сокращение повреждаемости тепловых сетей в Ижевске. В 2016 г. было выявлено 3607 повреждений на тепловых сетях. В 2018 г. было зафиксировано 1909 повреждений. Снижение аварийности от уровня 2016 г. составило 47,0 %.

Таким образом, заключение концессионного соглашения позволило в несколько раз повысить уровень инвестиций, закрепить целевые показатели качества, надежности и энергоэффективности теплоснабжения потребителей в Ижевске.

Список источников

1. Схема теплоснабжения города Ижевска на период до 2031 г. Актуализированная версия (2016 г.). URL: <https://izhdoc.ru/izhdoc/info/22219.html> (дата обращения: 15.11.2020).
2. О концессионных соглашениях: федеральный закон от 21 июля 2005 г. № 115-ФЗ. Доступ из справ-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_54572/ (дата обращения: 15.11.2020).

УДК 621.182.2

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ КАСКАДНЫХ КРЫШНЫХ ГАЗОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Д. Д. Коршунова¹, Е. П. Павлова², Н. В. Колпакова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ korshunova.darya@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена установка каскадных крышных газовых котельных. Выявлены принципиальные отличия каскадных котельных в сравнении с установкой стандартной блочно-модульной котельной. Проанализированы основные преимущества установки каскадных крышных газовых котельных.

Ключевые слова: каскадная котельная, теплопотери, мощность, системы автоматики

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE INSTALLATION OF CASCADE ROOF GAS BOILERS

D. D. Korshunova¹, E. P. Pavlova², N. V. Kolpakova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ korshunova.darya@mail.ru

Abstract. The paper considers the installation of cascade roof gas boiler houses. The fundamental differences of cascade boiler houses in comparison with the installation of a standard block-modular boiler house are revealed. The main advantages of installing cascade roof gas boiler houses are analyzed.

Keywords: cascade boiler room, heat loss, power, automation systems

Крышные газовые котельные получили широкое распространение при децентрализованном отоплении как многоэтажных жилых домов, так и при отоплении нежилых строительных объектах. Суще-

ствуют принципиальные различия между каскадом котлов и параллельным их подключением.

Каскад — это совместное электрическое и гидравлическое подключение нескольких котлов, соединенных единой системой управления, и работающих для обеспечения нагрева теплоносителя для одного и того же объекта (подключенной тепловой сети) [1].

При этом в каскадной системе управления соблюдается принцип автоматического регулирования всеми процессами в работе котельной. Среди них есть обязательные принципы:

- 1) увеличение и снижение мощности котельной по внешнему запросу системы (расход теплоносителя, погода, помещение);
- 2) равномерный износ оборудования (смена очередности работы котлов);
- 3) смена схемы очередности запуска котлов (перераспределение нагрузки) при выходе из строя одного или нескольких агрегатов;
- 4) снижение мощности работающего котла перед запуском очередного в работу (отсутствие ступенчатости в работе, плавность модуляции всей котельной);
- 5) контроль работы внешних насосов системы и их систематический запуск при длительном простое системы.

В зависимости от эксплуатационных особенностей объекта потребления тепловой энергии в систему управления каскадом котлов могут вноситься и другие автоматические элементы функционирования.

Практика подтвердила, что в отопительный сезон отдельный котел используется в среднем на 30 %. Такая малая нагрузка позволяет характеризовать работу как неэффективную. В противоположность этому каскадная система обеспечивает необходимую мощность постепенно, подключая один за другим несколько «малых» котлов вместо одного большого [1].

Диапазон изменения мощности каскада и вид установленного котельного оборудования позволяет постоянно работать с низкой температурой отопительной воды, начиная уже от +30 °С на подающей магистрали без подмеса из обратного контура, что значительно снижает расход энергоносителя, потери на излучение и в период простоя системы.

В зависимости от используемого производителя каскадного контроллера в каскад можно объединить от 2-х элементов до 8-ми, 16-ти, 32-х и более, при этом нет ограничения в мощности самих котлов

(рис. 1). Количество котлов в каскаде и их единичная мощность должна быть обусловлена, в первую очередь, экономической целесообразностью и спецификой жизнедеятельности потребителя тепла. Так, при установке в каскад 16-ти котлов мощностью по 2000 кВт каждый суммарная мощность котельной достигает 32 МВт, а минимально выходящая из котельной — всего 0,8 МВт, без перетопов и простоев системы. Этот режим работы котельной особенно важен в начале и конце отопительного периода (межсезонье), а также в летний период — для подготовки горячего водоснабжения (ГВС).

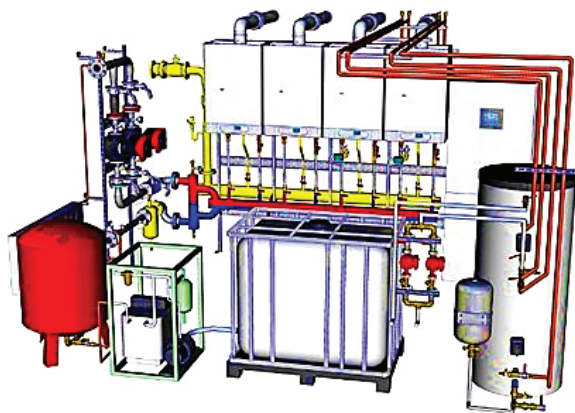


Рис. 1. Каскадная котельная

Интенсивность обогрева жилья зависит во многом от погоды на улице. Управление работой котельной в автоматическом режиме может быть организовано в зависимости от внешних запросов системы. Каскадная схема позволяет оперативно управлять всеми процессами, причем без вмешательства пользователя, в автоматическом режиме. Именно этим и определяется экономия газа, экономия фонда заработной платы и комфортный микроклимат. Любое техническое устройство имеет свой ресурс и характеризуется наработкой «на отказ» [2].

Кроме прямой экономии энергоносителя за счет широкого диапазона автоматического регулирования мощности, возможности работы на низких температурах теплоносителя (от $+30$ до $+80$ °С для настенных котлов) без подмеса из обратного контура и работы оборудования с КПД 92–94 % независимо от нагрузки котельной и подготовки ГВС через бойлера косвенного нагрева, каскадные котельные имеют

ряд неоспоримых достоинств при выборе места установки, проектировании, монтаже, пусконаладке, эксплуатации и ремонте. Расположение котельной практически не имеет ограничений в соответствии с действующими нормами и правилами. Небольшой вес, настенное размещение и отсутствие вибрации при работе котлов позволяет получать тепло и ГВС в многоквартирных жилых домах [2].

Выделим основные преимущества применения каскадных котельных:

1) высокий КПД котельной, который существенно сокращает срок окупаемости;

1) компактность, позволяющая размещать котельную в сложных условиях;

2) повышенная живучесть всей системы;

3) широкий диапазон мощности;

4) высокий класс экологичности (меньшая мощность котла создаст меньшие выбросы вредных веществ при горении);

5) крайне низкий уровень шума, не превышающий 50–55 дБ, что дает возможность избежать дополнительных мероприятий по снижению уровня шума до нормативного;

6) простота наладки и обслуживания (при запуске каскада конденсационных котлов с интегрированной автоматикой проходит значительно проще, чем пуск водогрейных котлов, и может быть выполнен квалифицированными сотрудниками любой лицензированной монтажной организации).

Список источников

1. Сахаров В. И. Каскадные котельные из настенных котлов [Электронный ресурс] // СОК. 2014. № 7. URL: c-o-k.ru/articles/kaskadnye-kotel-nye-iz-nastennyh-kotlov-populyarnost-rastet (дата обращения: 28.11.2020).

2. Каскадные подключение газовых котлов [Электронный ресурс] // АЛЬФАТЭП. 2017. URL: https://alfatep.ru/article/kotly_otopleniya/kaskadnoe-podklyuchenie-gazovyh-kotlov/ (дата обращения: 24.11.2020).

УДК 669.1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ТОПЛИВНОЕ ЧИСЛО ПРИ ДОБЫЧЕ РУДЫ

А. В. Лаптева¹, В. Г. Лисиенко², Ю. Н. Чесноков³, Я. М. Щелоков⁴

¹ Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

^{2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

⁴ Союз «Энергоэффективность», Екатеринбург, Россия

¹ annalapteva@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрено решение задачи оценки энергоемкости процессов в черной металлургии с использованием технологических топливных чисел. Показано, что применение в карьерных работах более мощного оборудования уменьшает энергоемкость добычи руды.

Ключевые слова: энергоемкость, теплота сгорания, буровой станок, взрывчатое вещество, экскаватор, автосамосвал, тяговый агрегат, конусная дробилка, шаровая мельница, тепловоз

PROCESS FUEL NUMBER DURING ORE MINING

A. V. Lapteva¹, V. G. Lisienko², Yu. N. Chesnokov³, Y. M. Shchelokov⁴

¹ Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

^{2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

⁴ Soyuz "Energy Efficiency", Ekaterinburg, Russia

¹ annalapteva@mail.ru

Abstract. This paper considers the solution to the problem of assessing the energy intensity of processes in ferrous metallurgy using technological fuel numbers. It has been shown that the use in quarrying of more powerful equipment reduces the energy intensity of ore extraction.

Keywords: energy intensity, heat of combustion, drilling machine, explosive, excavator, automatic dump truck, traction unit, cone crusher, ball mill, diesel locomotive

В ряде работ, посвященных черной металлургии, энергоемкость продукции оценивается сквозной энергоемкостью, так называе-

мым технологическим топливным числом (ТТЧ). Задача оценки энергоемкости этих процессов решается в настоящей работе. Оценка основана на вычислении общих затрат энергии на буровзрывные работы, погрузку и транспортировку отбойки из забоя и из карьера на ГОК, дробление, измельчение некоторой массы руды. ТТЧ определяется делением значения этих затрат энергии на массу руды.

ТТЧ характеризует сквозную энергоемкость продукции и равняется суммарным расходам всех видов энергии в конкретном и во всех предшествующих производствах технологических процессов, пересчитанных на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ, образуемых вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР). Единица измерения ТТЧ — (кг у. т.)/(ед. прод.). Следовательно, ТТЧ имеет следующий состав [1–4]:

$$\text{ТТЧ} = \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 - \Theta_4,$$

где Θ_1 — первичная энергия; Θ_2 — энергия производных энергоносителей; Θ_3 — скрытая энергия, т. е. энергия, содержащаяся в исходных материалах, оборудовании, капитальных сооружениях конкретного процесса, а также в операциях по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии, например ремонты и т. п.; Θ_4 — энергия использованных ВЭР.

Для ископаемого топлива ТТЧ вычисляется по формуле

$$\text{ТТЧ} = 1,2Q_{\text{н}}^{\text{р}},$$

где 1,2 — коэффициент, служащий для учета энергозатрат на добычу, транспортировку и подготовку топлива; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая рабочая теплота сгорания ископаемого топлива, кг у. т. Для другой продукции ТТЧ определяется суммой ТТЧ_i ресурсов, необходимых для изготовления этой продукции с учетом их расхода.

ТАЧ — составляющая Θ_3 — рассчитывается по формуле:

$$\text{ТАЧ} = \frac{A}{C_{\text{спр. г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н. пр. г.}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н. у. т.}}^{\text{р}}} = A K_{\text{п}},$$

где A — величина амортизационных отчислений в денежном эквиваленте, р./(ед. прод.); $C_{\text{спр. г.}}$ — себестоимость природного газа, р./м³; $Q_{\text{н. пр. г.}}^{\text{р}}$ — низшая рабочая теплота сгорания природного газа, МДж/м³; $Q_{\text{н. у. т.}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/(кг у. т.) — низшая рабочая теплота сгорания условного топлива, МДж/(кг у. т.); $K_{\text{п}}$ — коэффициент приведения, (кг у. т.)/р.

Для природного газа примем $Q_{н. пр. г}^p = 35,8$ МДж/(кг у. т.). В связи с инфляцией значение A изменяется с годами.

При добыче руды открытым способом каждый карьер и горно-обогачительный комбинат (ГОК) используют различную технику. Для расчета ТТЧ предположим, что в некотором усредненном карьере производятся буровые, взрывные, погрузочные, транспортные работы, а также дробление и измельчение. Из предварительных расчетов определим, что 18 т взрывчатого вещества образуют 166 тыс. т отбойки, которая вывозится из карьера за 24 ч.

При расчетах энергопотребления учитывалась работа только основного оборудования при допущении его работы на полной мощности. За счет этого допущения энергия, затраченная на работу вспомогательного оборудования (бульдозеров, заряжающих машин, обслуживающего транспорта и др.), не рассматривалась, а также не учитывались затраты энергии на вскрышные работы.

Энергопотребление i -го процесса (бурение, погрузка и т. п.) определяется произведением

$$EC_i = Q_i n_i t_i .$$

Общее энергопотребление «Итого» в (кВт · ч) найдено по формуле:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N EC_i ,$$

где Q_i — мощность двигателя i -ого агрегата; n_i — количество этих агрегатов; t_i — время работы каждого агрегата; N — количество переделов.

После обогащения образуется 4080 т медного концентрата, который загружается в состав маневровым тепловозом. До комбината цветной металлургии этот состав тепловозной тягой идет сутки, т. к. источники сырья для получения цветных металлов располагаются близко к ГОК. Этот состав доставляется до комбината черной металлургии трое суток тепловозной тягой.

Для железной руды с высокой концентрацией Fe примем равными концентрации отбойки и концентрата.

Данные по потреблению бензина вспомогательным автотранспортном и моторного масла дизельными двигателями отсутствуют. Расходы каждого ресурса на 1 т отбойки рассчитаны по формуле:

$$\Psi = \frac{0,123 Q_{nt}}{166000} .$$

Обозначения раскрыты в предыдущей формуле. Расходы дизельного топлива определены с учетом значения удельного потребления $q = 210 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$:

$$\Psi_{\text{дт}} = \frac{0,123Q_{\text{нт}}}{166000 \cdot 1000000} \cdot$$

Определение ТТЧ процессов добычи, дробления, доставки железного концентрата основано на вычислении общих затрат энергии на добычу некоторой массы руды (концентрата) и делении значения этих затрат на эту массу. Найдено ТТЧ добычи, дробления, доставки железного концентрата, равное $12,41 \text{ (кг у. т.)}/\text{т}$. Таким образом, ТТЧ процессов получения концентрата богатых железных руд составляет $12,41/(946 \cdot 100) = 1,31 \%$. Для бедных руд (Качканарского ГОК) ТТЧ концентрата превысит 10% . ТТЧ меди пока неизвестно, но ТТЧ процессов получения медного концентрата больше в $114,91/12,41 = 9,25$ раз по сравнению с ТТЧ процессов получения железного концентрата.

Список источников

1. Щелоков Я. М. Об энерготехнологической производительности сталеплавильных производств // Сталь. 1988. № 9. С. 20–21.
2. Лисиенко В. Г., Розин С. Е., Щелоков Я. М. Методика расчета и использование технологических топливных чисел // Изв. высш. учеб. заведений. Чер. металлургия. 1987. № 2. С. 108–112.
3. Лисиенко В. Г., Пареньков А. Е., Лаптева А. В. Оценка энергоэффективности альтернативных бескоксowych металлургических технологий // Сталь. 2009. № 2. С. 72–77.
4. Лисиенко В. Г., Чесноков Ю. Н., Лаптева А. В. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксowych процессов производства чугуна и стали // Металлург. 2011. № 7. С. 40–45.

УДК 697.4

ПЕРЕХОД НА ПОНИЖЕННЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАФИК СЕТЕВОЙ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КАК АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА

Е. А. Лыскова¹, Д. М. Суворов²

^{1,2} Вятский государственный университет, Киров, Россия

¹ liskova.eka@lyandex.ru

Аннотация. Рассмотрены два аспекта перехода систем теплоснабжения на температурные графики с пониженной температурой сетевой воды. Первый из них касается уменьшения температуры прямой сетевой воды, что дает возможность работать без срезки графика в области низких температур воздуха, но приводит к необходимости модернизации систем регулирования для потребителей отопления на тепловых пунктах. Второй аспект относится к возможности понижения температуры обратной сетевой воды. Определена задача дальнейших исследований.

Ключевые слова: система теплоснабжения, температурный график, прямая сетевая вода, обратная сетевая вода, тепловое потребление

TRANSITION TO REDUCED TEMPERATURE SCHEDULE OF DELIVERY WATER IN HEAT SUPPLY SYSTEMS AS A TOPICAL PROBLEM

E. A. Lyskova¹, D. M. Suvorov²

^{1,2} Vyatka State University, Kirov, Russia

¹ liskova.eka@lyandex.ru

Abstract. Two aspects of the transition of heat supply systems to temperature schedules with a reduced temperature of delivery water are considered. The first of them concerns a decrease in the temperature of direct delivery water, which makes it possible to work without cutting off the schedule in the area of low air temperatures, but leads to the need to modernize control systems for heating consumers at heat points. A second aspect relates to the possibility of lowering the return delivery water temperature. The task of further research is determined.

Keywords: heat supply system, temperature schedule, direct delivery water, return delivery water, heat consumption

Работа при пониженных температурных графиках сетевой воды для источника теплоснабжения имеет два не связанных друг с другом направления: работа при пониженном графике температур прямой сетевой воды и работа при пониженном графике температур обратной сетевой воды. В ряде случаев могут быть рассмотрены системы или способы регулирования, в которых достигается одновременное существенное понижение температур сетевой воды как в подающей, так и в обратной линиях теплосети в течение всего отопительного периода или в основной по времени его части, но они требуют использования количественно-качественного регулирования нагрузки потребителей [1; 2] и отдельного обоснования и анализа.

Перейдем к рассмотрению первого аспекта. При работе на заданную тепловую нагрузку потребителей и отсутствии реконструкции систем теплопотребления абонентов понижение температуры прямой сетевой воды может не приводить к изменению тепловой нагрузки и температуры обратной сетевой воды для потребителей отопления на тепловых пунктах, если они оснащены устройствами регулирования теплопотребления в контуре отопления, поскольку не меняются температуры прямой воды отопительных контуров систем отопления этих абонентов при их местном регулировании (за счет изменения сопел элеваторов или при использовании регулируемых подмешивающих насосов на тепловых пунктах). Если же такое регулирование на тепловых пунктах (ТП) отсутствует, то понижение температур сетевой воды в подающей линии приведет к уменьшению тепловой нагрузки потребителей отопления («недотопу»), но при этом несколько понизится и температура сетевой воды в обратной линии [1; 3].

Рассмотрим в качестве источника теплоты теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), использующую стандартный температурный график 150/70 °С со срезкой в диапазоне 130–140 °С. В таком случае имеется возможность перехода на пониженный температурный график 130/70 °С без срезки. Такой переход улучшит качество регулирования в области низких температур воздуха, предотвращая «недотопы», но он связан с ростом расчетных расходов сетевой воды в течение большей части отопительного периода. Однако большинство исследователей предлагает более низкие расчетные температуры прямой сетевой воды t_1 , чаще всего от 110 до 120 °С [4]. Очевидно, что такой переход в общем случае потребует реконструкции ТП потребителей с оснащением их системами насосного автоматического регулирования отопления, а также

существенного увеличения расходов сетевой воды в тепломагистралях, что приведет к росту гидравлических потерь в сети, затрат электроэнергии на привод сетевых насосов; кроме того, может потребоваться увеличение диаметров ряда магистральных теплопроводов на трубопроводы большего диаметра с большими удельными тепловыми потерями [4; 5]. При этом абоненты не меняют свой температурный график 90/70 °С, т. е. расходы воды в системах отопления абонентов остаются неизменными.

Второй аспект проблемы состоит в определении возможностей и условий снижения температуры сетевой воды в обратной линии теплосети в сравнении с работой по стандартному графику. Такое снижение возможно, во-первых, при переходе потребителей всех ТП на низкотемпературные системы отопления абонентов, позволяющих обеспечить температуры 40–50 °С в обратной линии теплосети при расчетной температуре воздуха. Теоретически такое возможно для крупных районов нового строительства, поэтому непосредственный переход на температурные графики с такой расчетной температурой в обратной линии возможен только для новых источников (ТЭЦ и котельных), вся отопительная нагрузка которых представляет собой нагрузку таких новых районов. Во-вторых, понижение расчетной температуры воды в обратной линии теплосети до 40–60 °С возможно при применении в системах централизованного теплоснабжения теплонасосных установок (ТНУ) разных видов и по разным схемам. Однако все корректные расчеты показывают энергетическую и экономическую нецелесообразность применения ТНУ в этих условиях [6; 7].

Таким образом, выполненный анализ проблемы перехода на пониженные температурные графики позволил авторам охарактеризовать два ее важнейших аспекта и поставить задачу дальнейшего исследования. В качестве такой задачи предполагается разработка и использование адекватных математических моделей систем теплоснабжения [1; 2; 5] для исследования эффективности систем теплоснабжения при любых возможных графиках температур как прямой, так и обратной сетевой воды с учетом всех имеющихся ограничений при наличии количественно-качественного регулирования тепловой нагрузки как источника, так и потребителей.

Список источников

1. Pyatin A. A, Suvorov D. M. Extended Schedule of Heating Regulation: Assessment of the Impact on the Efficiency of Steam Turbine CHP Plants

[Electronic resource] // Problemele Energeticii Regionale. 2020. Vol. 47, № 3. P. 40–55. DOI: 10.5281/zenodo.4018949 (date of access: 15.11.2020).

2. Рафальская Т. А., Мансуров А. Р., Мансурова И. Р. Исследование переменных режимов работы систем централизованного теплоснабжения при качественно-количественном регулировании // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 2. С. 79–91.

3. Попова Е. С, Шемпелев А. Г. Анализ возможности и целесообразности автоматизации индивидуальных тепловых пунктов и их перехода на работу по пониженному температурному графику в условиях города Кирова // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сб. ст. XVIII Всерос. науч.-практ. конф., г. Киров, 2–28 апр. 2018 г. Киров : Вят. гос. ун-т. 2018. С. 822–830.

4. О температурном графике работы теплофикационных систем городов / П. В. Ротов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 6 (80). С. 39–42.

5. Рафальская Т. А., Рохлецева Т. Л., Тюсов С. М. Центральное регулирование без верхней срезки: возможности и перспективы // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. 2018. № 5 (713). С. 91–104.

6. Комбинированная система теплоснабжения с ТЭЦ и локальными тепловыми насосами / М. Л. Шит [и др.] // Проблемы регион. энергетики. 2020. № 1 (45). С. 81–93.

7. Кузник В. И. Централизованное теплоснабжение: проектируем эффективность. М. : Изд. дом МЭИ, 2008. 155 с.

УДК 624.04

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ 19-ЭТАЖНОГО МНОГOKВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА

Лю Цзиньюань¹, Т. Н. Жильникова², В. И. Велькин³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ 1033051017@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена повышению эффективности проектирования сложного объекта. Выполнен расчет многоквартирного дома на основе автоматизированного программного пакета (ПП) «Лира», который позволил минимизировать ошибки при расчетах, сократить во времени уточненный расчет несущих конструкций объекта, представить анализ и визуализацию нагрузок. С помощью прикладного пакета построен сетевой график хода строительства, что способствовало повышению эффективности проектирования и сокращению производственного строительного цикла.

Ключевые слова: энергоэффективность, архитектура, строительная технология, компьютерное проектирование зданий

DESIGN AND AUTOMATED CALCULATION OF A 19-STOREY APARTMENT BUILDING

Liu Jinyuan¹, T. N. Zhilnikova², V. I. Velkin³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ 1033051017@mail.ru

Abstract. The work is devoted to improving the efficiency of designing a complex object. The calculation of an apartment building is based on the automated software package “Lira”. PP “Lira” allowed to minimize errors in calculations, to reduce the time of refined calculation of the object’s load-bearing structures, to present an analysis and visualization of loads. Using the application package, a network schedule of construction progress was built, which helped to improve the design efficiency and reduce the production construction cycle.

Keywords: energy Efficiency, architecture, construction technology, computer-aided design of buildings

Цель работы — разработка архитектурно-проектной и строительной-технической документации на базе использования прикладного пакета (ПП) «Лира» при расчете многоквартирного дома.

Задачи исследования: разработка архитектурно-строительных решений для возведения 19-этажного 162-квартирного жилого здания со встроенными помещениями, расчет и проектирование его типовой конструкции.

Описание объекта исследования: в мире при проектировании объектов и сооружений большое значение придается вопросам энергоэффективности и энергосбережения [1].

В статье рассматриваются расчетные показатели при проектировании многоквартирного жилого дома в мегаполисе [2]. Отведенный под строительство 19-этажного жилого дома участок расположен в Ростове-на-Дону. Здание имеет в плане Г-образную форму.

Приведен расчет монолитной железобетонной плиты [3], произведенный в программном комплексе «Лира», а также произведен расчет свайных фундаментов из буронабивных свай [4; 5].

ПП «Лира» является современным инструментом численного исследования прочности и устойчивости конструкций и их автоматизированного проектирования. Это программное обеспечение в области расчета нагрузок строительной конструкции по сравнению с другими программными средствами (Ansys) позволяет создавать графическое отображение и является более интуитивно понятным, лучше воспринимается при структурном анализе расчета зданий (рис. 1).

Для расчета теплоизоляции помещения, а также сопротивления теплопередаче наружной стены, применяли формулу:

$$R_0 = 1/\alpha_B + R_1 + R_2 + R_3 + 1/\alpha_H, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт},$$

где α_B, α_H — коэффициенты теплоотдачи поверхности стены по нормам, $\alpha_B = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha_H = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $R_1 + R_2 + R_3$ — термические сопротивления конструктивных слоев стены; в общем виде $R_i = \delta_i/\lambda_i$.

Для определения нагрузок при размещении свай под ростверком определялась несущая способность буронабивной висячей сваи по формуле:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cr} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i),$$

где γ_c — коэффициент условий работы сваи в грунте, $\gamma_c = 0,8$; R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи; A — площадь опирания сваи на грунт, $A = (3,14 \cdot 0,62)/4 = 0,283 \text{ м}^2$; u — наружный периметр поперечного сечения сваи, $u = 1,884 \text{ м}^2$; f_i — расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания по боковой поверхности сваи; h_i — толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; $\gamma_{cr} = 1$, $\gamma_{cf} = 0,7$ — коэффициенты условий работы грунта под нижним концом и на боковой поверхности сваи соответственно, учитывающие влияние способа погружения сваи на расчетное сопротивление грунта.

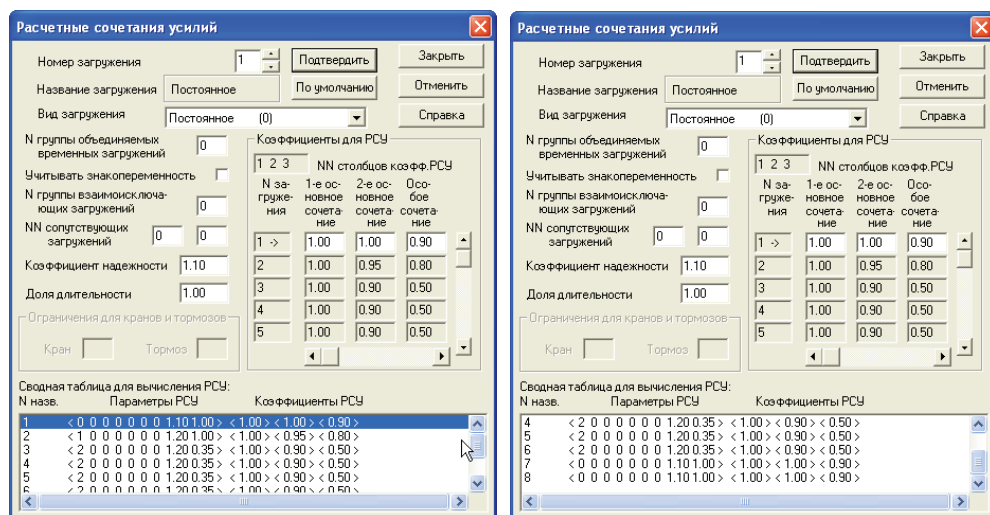


Рис. 1. Окна программного комплекса «Лира»

До начала работ по устройству шпунтовых стенок должны быть выполнены все земляные работы, включая отрывку котлована, разбивку осей шпунтового ряда, ограждение площадки строительства, временных и постоянных дорог, обеспечение электроснабжением и водоснабжением строительной площадки, установку временных зданий и сооружений и т. д.

В рабочую зону строительной площадки должны быть доставлены необходимые машины, механизмы и приспособления, а также конструкции и материалы, выполнены все мероприятия по безопасному ведению строительно-монтажных работ, сделана геодезическая разбивка. Отклонение геометрических осей свай от проектного положения при геодезической разбивке не должно превышать 5 см.

В работе приведен график производства работ, выполненный в программном пакете «Лира» (рис. 2).

График производства работ

№ п/п	Наименование работ	Ед. изм.	Объем работ	Трудоемкость чел. дн.		Состав звена	Кл.	Рабочие дни																								
				нормируемая	планир.			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21				
1	Перемещение буровой установки СО-2	1 перемещ.	185	9	92.7	90	Мш5-1 Пш4-1 Пш3-1	1.03							3																	
	Бурение скважин установкой СО-2	1м	2232	83.7																												
2	Перемещение грунта погрузчиком фронт. типа	100м ³	7.57	4.87		4	В.погр. 4-1	1.22	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3	Сварка нахлесточных соединений	10соед.	151.2	6.62		6	Сш 6-1 Сш 5-1 Сш 4-1	1.10	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4	а)Строп. арм. каркаса б)Подъем и под. в скваж. в)Расстроп. арм. каркаса	1шт	186	11.16	64.41	45	МК6-1 Б4-1 Б3-1	1.43																								
	Установка обсадного патрубка	1 установ.	186	8.37																												
	Установка бетонолит- ной трубы	1 установ.	186	16.04											3																	
	Бетонирование свай (ВПТ)	1м ³	630.76	14.19																												
	Снятие бетонолитной трубы	1 снятие	186	9.77																												
	Снятие обсадного патрубка	1 снятие	186	4.88																												
5	Вязка арматурных каркасов ростверка	т	5.46	9.55		8	Ар5-1 Ар2-1	1.19																				2				
6	Установка опалубки ростверка	1м ²	147.6	7.17		5	Сш4-1 Сш3-1	1.43																				2				
7	Бетонирование ростверка	1м ³	44.09	1.26	1.47	1	Б4-1 Б2-1	1.47																					2			
	Уход за бетоном	100м ²	1.47	0.21																												
8	Разборка опалубки ростверка	1м ²	147.6	3.86		3	Сш3-1 Сш2-1	1.29																				2				
				190.65		162		1.18																								

Рис. 2. График выполнения работ программного пакета «Лира»

Результаты исследования и выводы: использование для расчета программного пакета «Лира» позволило уменьшить ошибки, сократить вторичный процесс расчета, выполнить анализ и визуализацию сил. Представлен график хода строительства, способствующий повышению эффективности работы, в результате чего цикл строительства был оптимизирован (сокращен).

Список источников

1. Велькин В. И., Щелоков Я. М., Щеклеин С. Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение. Екатеринбург : УрФУ, 2020. 318 с.
2. Бессонова О. А., Машкин О. В. Организация строительства при возведении зданий с металлическим каркасом. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 41 с.
3. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М. : Минрегион РФ, 2011.
4. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М. : Минрегион РФ, 2011.
5. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. М. : Минрегион РФ, 2011.

УДК 69.003.13

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ

К. В. Мальцева¹, С. В. Придвижкин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ksenemaltsevs@mail.ru

Аннотация. В работе проанализирован экономический эффект от внедрения энергосберегающих мероприятий при капитальном ремонте панельных жилых домов. Авторами предложены варианты для финансирования работ по повышению энергетической эффективности существующих жилых домов. В статье рассмотрены экономические и социальные последствия проведения указанных мероприятий.

Ключевые слова: энергоэффективность; энергопотребление; тепловая защита; капитальный ремонт; жилищно-коммунальное хозяйство

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS DURING RECONSTRUCTION

K. V. Maltceva¹, S. V. Pridvzhkin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ksenemaltsevs@mail.ru

Abstract. The paper analyzes the economic effect of the introduction of energy-saving measures during the reconstruction of panel residential buildings. The authors proposed options for financing projects to improve the energy efficiency of existing residential buildings. The article discusses the economic and social consequences of these activities.

Keywords: energy efficiency; power usage; thermal protection; reconstruction; Department of Housing and Utilities

Эксплуатация зданий и сооружений — отрасль с наиболее высоким уровнем потребления энергетических ресурсов. По оценке Минэнерго РФ, потенциал энергосбережения в сфере ЖКХ составляет около 95–110 млн т у. т. [1]. Согласно данным Фонда содействия реформирования жилищно-коммунального хозяйства более 6000 многоквартирных домов в Свердловской области — панельные, построенные преимущественно во второй половине XX в. [2]. Этот показатель типичен для регионов России, ведь панельное домостроение в послевоенные годы стало возможностью для восстановления разрушенных в ходе боевых действий городов в сжатые сроки, а в последующие годы удовлетворяло спрос на жилье в условиях стремительного повышения темпов урбанизации. Сегодня же эти дома, не истратив потенциал по несущей способности, с точки зрения энергопотребления уже не отвечают требованиям современного человека. Одной из главных проблем в этих домах является поддержание комфортного температурно-влажностного режима. Также следует отметить экономическую сторону вопроса, ведь потери тепловой энергии в зимний период и дополнительное охлаждение воздуха в летний — это прямые издержки граждан.

Международный опыт показал, что одним из решений этой проблемы является проведение капитального ремонта многоквартирных жилых домов с утеплением ограждающих конструкций, заменой оконных и дверных блоков, установкой индивидуального теплового узла на дом с датчиками изменения температуры наружного воздуха (при технической возможности) [3–7].

В работе проанализирован экономический эффект от проведения перечисленных мероприятий. Расчет проводился для пятиэтажного жилого дома серии 1–464 в Екатеринбурге, построенного в период 1960–1970 гг. В модели был рассмотрен минимальный перечень работ, которые могут быть проведены в любом здании: утепление наружных стен, кровли и перекрытия над подвалом, замена окон на более эффективные двухкамерные пластиковые стеклопакеты.

Затраты на капитальный ремонт составят около 5,6 млн р. Возврат вложенных средств осуществляется только за счет снижения затрат собственников на отопление.

Период окупаемости мероприятий по повышению энергоэффективности показан на рис. 1.

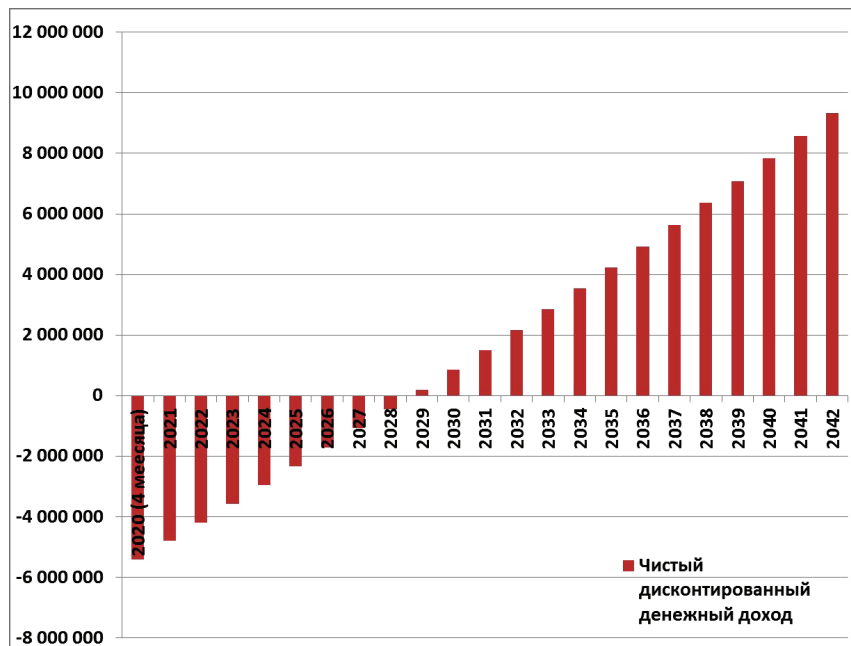


Рис. 1. Окупаемость проекта (годы)

Таким образом, срок окупаемости по модели составит чуть менее 9 лет. В этом расчете рассматривались только собственные инвестиции граждан. Законодательством РФ предусмотрены два пути накопления средств на капитальный ремонт: 1) на счете регионального оператора; 2) на специальном счете многоквартирного дома.

Средний размер минимального взноса на капитальный ремонт по стране составляет 6–7 р./м². Для того чтобы накопить на капитальный ремонт без учета инфляции понадобится от 22 до 44 лет. Мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности ведут к существенному удорожанию капитального ремонта, а, следовательно, увеличению периода накопления до 74–104 лет. В связи с потребностью в текущем ремонте зданий накопление необходимой суммы становится невозможным.

Если рассмотреть возможность проектного банковского финансирования, то проведение энергоэффективного капитального ремонта станет с финансовой точки зрения более реальным. При этом с учетом текущих процентных ставок показатели экономической эффективности проекта не снизятся.

В настоящее время система кредитования капитального ремонта в нашей стране не выстроена. Примеры получения займа на подобные виды работ носят единичный характер.

Для оформления кредитного договора необходимо определить, кто будет являться заемщиком, что будет являться залогом и каким образом, будет проходить погашение задолженности. Более того, с позиции банка будут интересны комплексные проекты, с объемом финансирования более 100 млн р.

Осуществление подобных проектов по капитальному ремонту жилых домов может реализовывать энергосервисная компания. В этом случае организация проводит за свой счет весь комплекс работ по капитальному ремонту, в т. ч. предварительное обследование здания, разработку проекта и оценку его эффективности. По договору с управляющей компанией или товариществом собственников жилья (ТСЖ) компенсация расходов и определенной в договоре нормы прибыли будет происходить за счет разницы затрат на потребление энергии до и после проведения улучшений.

Энергосервисная компания может быть создана на базе крупных строительных холдингов, имеющих свои производственные мощности и список проверенных подрядных организаций. Также строительные корпорации имеют необходимый опыт привлечения заемного банковского финансирования, способны удовлетворить требования банков, перечисленные ранее.

Необходимо отметить заинтересованность государства в реализации описанной программы, т. к. это решение социальных и экономических вопросов, среди которых можно выделить:

- 1) улучшение качества жизни граждан;
- 2) снижение нагрузки на существующие инженерные сети и коммуникации;
- 3) решение части вопросов по развитию застроенных территорий;
- 4) расширение перечня банковских продуктов и проектов строительных компаний, которое повлечет за собой создание новых рабочих мест;
- 5) развитие образовательной и научной сфер.

Таким образом, повышение энергоэффективности панельных жилых домов экономически целесообразно, финансово реализуемо и имеет весомое значение на государственном уровне.

Список источников

1. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55070341/> (дата обращения: 28.11.2020).
2. Государственная корпорация — Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйств [Электронный ресурс]. URL: <https://www.reformagkh.ru/> (дата обращения: 28.11.2020).
3. Рыбакова Е. Ю., Череди́на И. С. Российская практика панельного домостроения и опыт Германии по реконструкции типового индустриального жилья // Новые идеи нового века. Т. 1. Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2017. С. 402—407.
4. Ковалев Д. В., Чудинова В. Г. Реконструкция и модернизация жилой среды крупнопанельных домов массовых серий [Электронный ресурс] // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия «Строительство и архитектура». 2013. № 1. С. 4—8. URL: <https://rucont.ru/efd/269148> (дата обращения: 28.11.2020).
5. Жуков Д. Энергосберегающая санация жилых зданий в Германии [Электронный ресурс]. 2010. URL: <https://nestor.minsk.by/sn/2010/27/02703.html> (дата обращения: 28.11.2020).
6. Коваль С. П. Реконструкция и модернизация (санация) жилых домов в Восточной Германии. Полезный опыт для России [Электронный ресурс]. URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/121> (дата обращения: 28.11.2020).
7. Бабенко Г. В., Лукин М. В. Анализ мировых тенденций и зарубежного опыта экономического обеспечения решения задач реновации зданий городских агломераций // Фундамент. исслед. 2017. № 4—2. С. 314—319.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЫНКА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В РЕСПУБЛИКЕ СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ — АЛАНИЯ

Е. Н. Малявин¹, К. А. Никитенко², А. А. Бозиев³, Р. В. Ключев⁴

^{1,2,3,4} Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

⁴ kluev-roman@rambler.ru

Аннотация. В работе проведен анализ энергетического рынка энергоресурсов на примере субъекта Северо-Кавказского федерального округа — Республики Северная Осетия — Алаания.

Ключевые слова: плата за электроэнергию, энергетический потенциал, энергоснабжающая организация

ANALYSIS OF THE STATE OF THE ENERGY RESOURCES MARKET IN REPUBLIC OF NORTH OSSETIA — ALANIA

E. N. Malyavin¹, K. A. Nikitenko², A. A. Boziev³, R. V. Klyuev⁴

^{1,2,3,4} North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological
University), Vladikavkaz, Russia

⁴ kluev-roman@rambler.ru

Abstract. The paper analyzes the energy market for energy resources using the example of the subject of the North Caucasus Federal District — the Republic of North Ossetia — Alania.

Keywords: electricity charge, energy potential, power supply organization

Продвижение Северной Осетии к рыночным отношениям требует, чтобы ее экономика представляла собой самоорганизующийся, динамически работающий организм, достаточно устойчивый к колебаниям рынка. Этому должно способствовать развитие собственного энергетического рынка как основной базы обеспечения ее внутренних потребностей в энергоресурсах [1–3].

В Алании вырабатывается около 10 % потребляемой в республике электроэнергии, а остальные 90 % приобретаются на межсистемном рынке «Южэнерго». Такое положение ставит республику в прямую зависимость от работы Ставропольской, Невинномысской и Новочеркасской ГЭС, долг которым сегодня составляет свыше 500 млн р. Решению проблемы обеспечения Северной Осетии собственными энергоносителями служит запущенный в 2020 г. каскад Зарамагской ГЭС мощностью 342 МВт. После ввода всего комплекса ГЭС, рассчитанного на производство 1 млрд 100 млн кВт · ч, потребности республики будут ориентировочно удовлетворены на 60 %. В этом случае мы получаем дешевую энергию, что благотворно скажется на развитии промышленно-производственной базы и уровне благосостояния людей.

Энергетический потенциал Северной Осетии этим не исчерпывается. Перед республикой в перспективе стоят еще более глобальные задачи, для решения которых имеются все основания. Общая характеристика крупнейших рек системы Терек в пределах горной Осетии, их естественные гидроресурсы дают возможность строительства каскада Урухских гидроэлектростанций мощностью 200 МВт и выработкой электроэнергии 740 млн кВт · ч. Кроме того, предусматривается строительство на Тереке Дарьяльской и Длиннодолинской станций общей мощностью 118 МВт и выработкой 567 млн кВт · ч. Таким образом, на гидроэлектростанциях общий объем производства электроэнергии составит около 2,5 млрд кВт · ч, половину которой в летний период можно продавать.

В концепции энергетической программы на федеральном уровне в качестве тактических мер по выводу экономики из стагнации наметен и осуществлен комплекс мероприятий:

- 1) формирование регулируемого энергетического рынка;
- 2) реформа ценообразования на энергоресурсы;
- 3) акционирование предприятий и объединений;
- 4) демонополизация отраслей топливно-энергетического комплекса;
- 5) осуществление межотраслевых энергосберегающих мероприятий;
- 6) защита потребителей от монополизма энергосистем;
- 7) повышение эффективности энергетического и технологического использования энергоресурсов.

Особое значение в рыночной экономике приобретает маркетинговая концепция деятельности электроэнергетики, которая предусматривает:

- 1) исследование методов управления спросом на энергоресурсы;
- 2) обоснованный выбор ценовой политики и системы тарификации;
- 3) совершенствование управления энергетическим хозяйством промышленных предприятий с использованием современных подходов и методов менеджмента;
- 4) организацию рекламы и сервиса в деятельности энергосистемы и энергетических хозяйств промышленных предприятий.

Сложная ситуация с рынком энергоресурсов в Алании заставляет пересмотреть сложившуюся систему обеспечения спроса потребителей энергии. Она должна быть направлена, с одной стороны, против существующего принципа поставщиков энергии «чем больше, тем лучше», а с другой — против пренебрежительного отношения потребителей электроэнергии к ее рациональному использованию и экономии. При таком подходе управление спросом может способствовать повышению эффективности использования оборудования, рационализации процессов потребления электроэнергии, увеличению коэффициента использования энергии и расширению возможности управления энергосистемами. В таком случае деятельность «Севкавказэнерго» более полно распространяется на территорию потребителя энергии. Управление спросом в условиях рыночных отношений и конкуренции должно осуществляться по программам, которые включают ряд мероприятий: обучение и коммуникация с потребителем, кооперация со смежниками, реклама и стимулирование, формирование и использование гибких цен и тарифов, поощрение потребителя.

В процессе реализации программ управления спросом решающую роль играют формальные и неформальные обследования потребителей и рынка сбыта энергии или отдельных его сегментов. Цель обследования состоит в формировании банка данных, отражающих: характер и технологию использования энергии потребителями в настоящее время; позиции потребителя, его покупательную способность, предпочтения и критерии принятия решений; потенциал рынка сбыта энергии; вероятные препятствия к участию потребителя в программе или принятию новой технологии использования энергии [4–5].

Используя различные методы исследования рынка сбыта энергии, АО «Севкавказэнерго» совместно с потребителями могут создавать необходимую информационную базу для оценки и разработки стратегии реализации управления спросом.

Список источников

1. Использование нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» при подготовке магистров / Р. В. Ключев [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). Екатеринбург : УрФУ. С. 827–831.
2. Использование ветроэлектростанции для электроснабжения потребителей в горных территориях / Р. В. Ключев [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). Екатеринбург : УрФУ. С. 756–759.
3. Результаты проведения энергоаудита в системе электроснабжения водоснабжающего предприятия РСО-Алания / Р. В. Ключев [и др.] // Worldscience: Problems and Innovations : сб. ст. XIX Международ. науч.-практ. конф. В 3 ч. Пенза: Наука и Просвещение, 2018. Ч. 1. С. 175–179.
4. Разработка научно-обоснованной концепции функционирования единой промышленно-энергетической системы / Р. В. Ключев [и др.] // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИИУС-2018) : материалы второй Международ. науч. конф., посвящ. 25-лет. юбилею КБНЦ РАН, Нальчик, 4–9 декабря 2018 г. Нальчик : Изд-во КБНЦ РАН, 2018. С. 321–328.
5. Концепция функционирования единой промышленно-энергетической системы в горных территориях / Р. В. Ключев [и др.] // Изв. КБНЦ РАН. 2018. № 6 (86). Ч. II. С. 55–65.

УДК 628.8

РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛА

Ю. С. Мороз¹, А. В. Никулин², Н. А. Третьякова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ moroz_yulia99@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена технология рекуперации воздуха в жилых помещениях.

Ключевые слова: энергосбережение, рекуперация, тепло, поток воздуха, система вентиляции

HEAT RECOVERY

Y. S. Moroz¹, A. N. Nikulin², N. A. Tretyakova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ moroz_yulia99@mail.ru

Abstract. The paper considers the technology of air recuperation in residential premises.

Keywords: energy saving, recuperation, warmly, airflow, ventilation system

Сохранение вентиляционной системы естественного типа без механического побуждения в современных зданиях привело к негативным явлениям, связанным с ухудшением качества воздушной среды, нарушением температурного и влажностного режимов помещений. К этому можно добавить, что в зданиях, строящихся по существующим нормативам, на вентиляционные выбросы приходится более 50 % теплопотерь здания.

После принятия федерального закона № 216-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» в России активизировалось проектирование и строительство энергоэффективных зданий. Для их создания должны использоваться энергосберега-

ющие технологии и материалы. В настоящее время установка приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла почти не используется по причине высокой стоимости [1; 2].

Один из вариантов сбережения энергоресурсов — метод рекуперации тепла в системах вентиляции и кондиционирования. В этом случае рекуперация представляет собой использование тепла вытяжного воздуха для нагрева приточного.

В состав установки приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла (рис. 1) входят: наружная установка, предназначенная для забора свежего воздуха с улицы; внутренняя установка для удаления отработанного воздуха на улицу; вентиляционная установка с рекуператором и др.

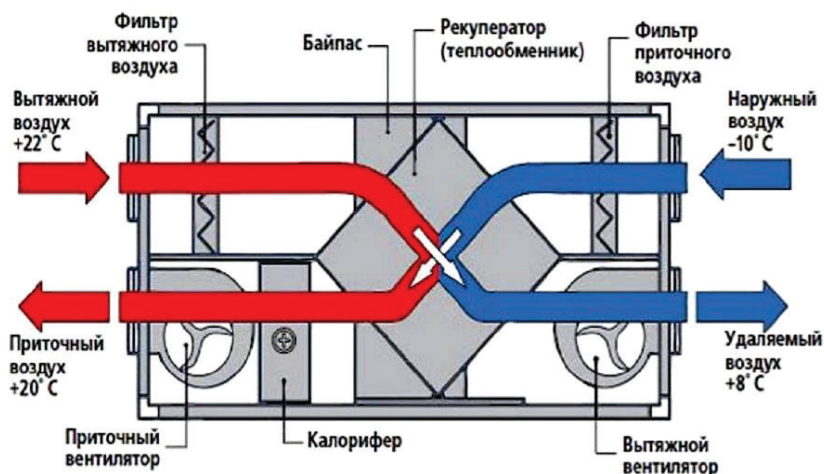


Рис. 1. Устройство приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла [3]

Прежде чем выпустить из дома теплый воздух, его пропускают через рекуператор. Здесь холодный воздух нагревается удаляемым из помещений теплым воздухом. Такая система не смешивает удаляемый воздух со свежим. Благодаря такой вентиляции система отопления может работать в менее нагруженных режимах, следовательно, сокращаются расходы на отопление.

Таким образом, выбрасываемый воздух отдает приточному до 70 % тепла и на выходе из рекуператора имеет температуру 2–6 °С, а при-

точный воздух имеет температуру на выходе из рекуператора 12–16 °С. Таким образом, калорифер будет нагревать воздух, имеющий начальную температуру +12 °С, а не –10 °С, что позволит значительно сэкономить на электрической или тепловой энергии, затрачиваемой на обогрев приточного воздуха [4].

Сегодня выпускается множество различных приточно-вытяжных установок с двумя видами рекуператора: роторной и пластинчатой конструкции. Пластинчатый рекуператор, в отличие от роторного не имеет движущихся частей и не смешивает входящие и выходящие потоки воздуха, сохраняя влажность подающегося воздуха.

Пластинчатый рекуператор — самый распространенный вид рекуператоров, который применяется в системах приточно-вытяжной вентиляции. Пластинчатые теплообменники намного дешевле в сравнении с роторными моделями. Выходящий воздух, проходя через пластины отдает тепло и остывает перед выходом на улицу. Входящий воздух при прохождении пластин нагревается и в помещение поступает значительно более теплым. Воздушные потоки, направленные в разные стороны, не смешиваются, и экологичность составляет 100 %. КПД такого устройства при правильной установке достигает 60 %. Поскольку пластины изготавливаются из металла, на них накапливается конденсат. По этой причине сети с таким типом рекуператора оснащают дренажным трубопроводом — для вывода собирающейся влаги в канализационные сети [3; 4].

Основу роторных устройств составляет ротор — вращающийся барабан из алюминия, который отбирает тепло у уходящего потока и передает его входящему. Роторная система несколько сложнее пластинчатой, поскольку в ее состав входит двигатель, который используется для работы барабана. Помимо этого, имеются воздушные фильтры, сигнализаторы наличия вредных примесей и влаги, устройство дистанционного контроля. В таких системах КПД значительно выше и достигает 80 % [5].

Вентиляционные системы с рекуперацией тепла сохраняют тепло и возвращают тепловую энергию в помещение. Кроме того, такие системы позволяют удалять углекислый газ, устраняют повышенную влажность в помещениях, очищают воздух и обеспечивают фильтрацию помещения. Без рекуперации на обогрев частного дома затрачивается 6–10 кВт·ч за месяц, а при работе специального устройства этот показатель снижается на 60–80 % и составляет всего 1–2 кВт·ч

в месяц. Рекуперация может использоваться в любое время года, выравнивая температуру.

Список источников

1. СНиП 41–01–2003. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М. : Госстрой России, 2004. 60 с.

2. Кокорин О. Я. Энергосберегающие технологии функционирования систем вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха (систем ВОК). М. : Проспект, 1999. 206 с.

3. Приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией тепла: принцип действия, обзор достоинств и недостатков [Электронный ресурс]. URL: <https://kupisantehniky.ru/pritocno-vytaznaa-ventilacia-s-rekuperaciej-tepla-ustrojstvo-i-rabota/> (дата обращения: 06.12.2020).

4. Мершиева И. П., Мершиев А. А. Рекуперация тепла в здании // Инженерные системы и сооружения. 2013. № 4 (13). С. 16–21.

5. Глебова Н. В. Рекуперация тепла в системах вентиляции // Перспективы развития науки и образования : сб. науч. тр. по материалам Международ. науч.-практ. конф., г. Москва, 29 нояб. 2013 г. Люберцы : АР-Консалт, 2013. С. 33–34.

УДК 621.316.925

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСЧЕТ УСТАВОК ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ

И. О. Овчаров¹, Г. С. Шабалин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ioovch@mail.ru

Аннотация. В статье изложен способ расчета автоматических уставок одного из видов защит — токовой отсечки. Поясняется значимость создания алгоритмов автоматического расчета тока, с помощью которых обеспечивается правильное срабатывание защит. Предложено решение проблемы выбора уставок токовой отсечки при потере одного из источников питания или изменения электродвижущей силы балансирующего узла путем создания функции зависимости тока срабатывания защиты от измеряемых параметров.

Ключевые слова: алгоритм автоматического выбора уставок, релейная защита, токовая отсечка, автоматические системы управления

AUTOMATIC RECALCULATION OF CURRENT CUT-OFF SETTINGS

I. O. Ovcharov¹, G. S. Shabalin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ioovch@mail.ru

Abstract. The article describes a method for calculating automatic setpoints one the types protection, current cut-off. It explains the importance creating algorithms for automatic calculation the protection response current, which ensure their correct operation. A solution to the problem selecting current cut-off settings when one the power sources is lost or the EMF the balancing node changes is proposed by creating a function the protection response current dependence on the measured parameters.

Keywords: algorithm an automatic choice setting, relay protection, instantaneous overcurrent, the automatic control system

При эксплуатации энергосистема может находиться в различных состояниях, характеризующих ее работу. Релейная защита (РЗ) осуществляет непрерывный контроль состояния защищаемого участка системы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов [1]. Срабатывание защиты зависит от уставки — заданного значения характеристической величины, при котором выполняются все требования предъявляемым к ней.

Появление короткого замыкания (КЗ) несет за собой отключение элемента, тем самым меняя структуру сети. Неправильная настройка РЗ в случае отключения элемента может привести к тяжелым последствиям, таким как каскадные аварии с длительным сроком восстановления и большими финансовыми затратами.

В статье рассматривается РЗ на примере токовой отсечки (ТО), назначение которой — максимально быстрая ликвидация коротких замыканий, возникающих в начале рабочей зоны [2]. Селективность двухступенчатых ТО обеспечивается выбором необходимой величины тока срабатывания, а также выдержкой времени. Ток срабатывания защиты проверяется на зону действия первой ступени защиты, а также чувствительность второй ступени [3]. Расчеты проводятся на схеме (рис. 1) радиальной сети с двумя источниками [4]. Подстанции ПС1, ПС2, ПС3, ПС4 связаны с двумя системами С1 и С2 линии электропередач (ЛЭП). ТО установлены на линии Л3, Л4, Л5. Нарушение происходит при отключении Л2.

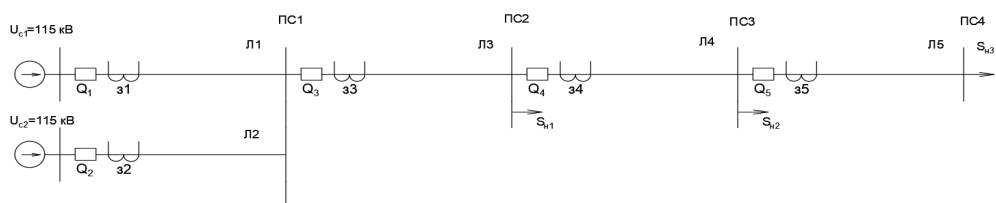


Рис. 1. Схема расчета токовой отсечки

При обычном выборе уставок ТО невозможно отстроиться от состава питающих источников. В табл. 1 выделены полужирным начертанием случаи, при которых ток защиты удовлетворяет ранее указанным требованиям; прямым начертанием обозначены случаи, при которых эти требования нарушаются.

Таблица 1

Расчет токов срабатывания при различном составе источников

Номер защиты		$I_{сз}^{(I)}, \text{кА}$	$I_{сз}^{(II)}, \text{кА}$	Питание от С1 и С2		Питание от С1	
				$Z_{отс. \%}^{(I)}$	$k_{ч}$	$Z_{отс. \%}^{(I)}$	$k_{ч}$
Защита 3	Макс. $I_{сз}$	1,117	0,832	82,12	2,25	–83,7	0,89
	Мин. $I_{сз}$	0,539	0,522	264,25	3,59	66,35	1,43

Изменение напряжения на ПС1 может происходить не только при изменении состава источников — необходимо также учитывать возможность изменения режима внешней сети, выражающейся в изменении напряжения источников питания. Обычный выбор уставок ТО не позволяет отстроиться от напряжения питающих источников и нагрузки сети. В табл. 2 полужирным начертанием выделены случаи, при которых использование уставок тока срабатывания удовлетворяет ранее указанным требованиям, прямым — при которых эти требования нарушаются [4].

Таблица 2

Расчет токов срабатывания при различных ЭДС системы

Номер защиты		$I_{сз}^{(I)}, \text{кА}$	$I_{сз}^{(II)}, \text{кА}$	$U_c = 120 \text{ кВ}$		$U_c = 105 \text{ кВ}$	
				$Z_{отс. \%}^{(I)}$	$k_{ч}$	$Z_{отс. \%}^{(I)}$	$k_{ч}$
Защита 3	max $I_{сз}$	0,619	0,545	66,17	1,49	26,22	1,31
	min $I_{сз}$	0,541	0,476	112,3	1,64	66,35	1,43

Чтобы составить функцию, необходимо при разных значениях напряжения базисных узлов выполнить расчет напряжения ПС1 и токов срабатывания всех защит. Полученные результаты расчета зависимости, на примере первой ступени Защиты 3 расположенной на ПС1, представлены на рис. 2. По этим данным была проведена линейная аппроксимация и составлены функции $I_{сз} = f(U_{ПС1})$ при различной нагрузочной мощности.

Полученные уравнения для разных мощностей имеют близкий по значению коэффициент наклона линии, а также свободный член уравнения, что можно использовать и составить функцию зависимости свободного члена уравнения от нагрузочной мощности.

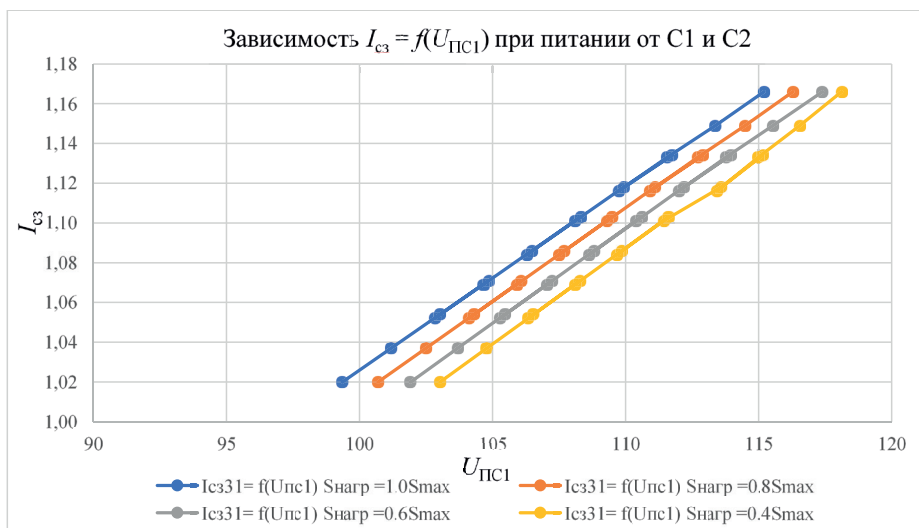


Рис. 2. Графическое построение зависимости $I_{сз} = f(U_{Пс1})$

В результате для первой ступени Защиты 3 была получена следующая функция для расчета тока срабатывания защиты

$$I_{сз3}^{(I)} = f(U_{Пс1}; S_{нагр}) = 0,0094 \cdot U_{Пс1} + 0,0045 \cdot S_{нагр} + 0,0009 \cdot \#$$

Функции, используемые при создании алгоритма (рис. 3), составляются аналогично. В качестве исходных данных используются контроль присоединений С1 и С2, а также снятые с трансформаторов значения тока и мощности. Расчет по заданному алгоритму позволяет учесть различные отклонения системы от нормального режима.

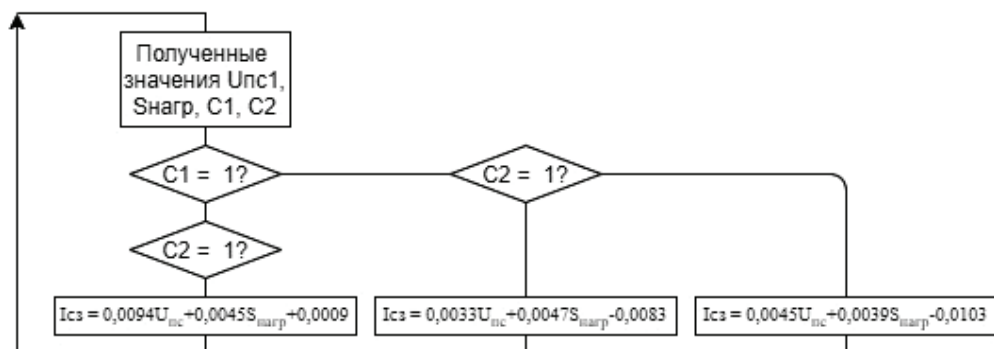


Рис. 3. Алгоритм выбора уставок

Таким образом, описана проблема выбора уставок ТО и предложен путь ее решения на основе создания алгоритма автоматического выбора уставок, который позволяет учесть требования к современным устройствам релейной защиты и автоматики (РЗА) и повысить их надежность. Алгоритм может использоваться на практике, для реализации на централизованном устройстве цифровой подстанции, а также в терминалах РЗА в качестве дополнительной функции. Также адаптивная РЗ повысит эффективность организации энергосистемы за счет снижения продолжительности и частоты технологических возмущений, тем самым приведет к росту ее эффективности в части расхода ресурсов, в том числе и энергетических, используемых при ее функционировании.

Список источников

1. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб. : ПЭИПК, 2010. 350 с.
2. Богатырев Л. Л., Богданова Л. Ф., Паздерин А. В. Релейная защита ЭЭС. Ч. 2. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. 44 с.
3. СТО 17330282.29.240.004—2008. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200080600/titles> (дата обращения: 08.11.2020).
4. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. М. : ЭНАС, 2012. 376 с.

УДК 621.3

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

И. Н. Одинаев¹, А. В. Паздерин², П. В. Мурзин³, Н. А. Морозенко⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ i.n.odinaev91@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе предложен метод компенсации погрешности трансформаторов тока (ТТ) в режиме, когда их магнитопровод насыщен. Показан поиск неизвестных параметров синусоидального сигнала. Также показана степень надежности метода относительно шума и количества измерений N .

Ключевые слова: трансформаторы тока (ТТ), компенсация погрешности, релейная защита, магнитопровод ТТ

CURRENT TRANSFORMER ERROR COMPENSATION UNDER SATURATION CONDITION

I. N. Odinaev¹, A. V. Pazderin², P. V. Murzin³, N. A. Morozenko⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ i.n.odinaev91@mail.ru

Abstract. The paper presents a method to compensate the error of current transformer under saturation condition. Based on least square method the factor decision process is shown. The method reliability against noises in measured signal is shown as well.

Keywords: Current transformers (CTs), error compensation, protection system, CT core

В настоящее время для обеспечения систем релейной защиты и автоматизации измерительной информацией в энергетических систе-

мах применяются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) класса точности Р, магнитопровод которых выполнен в виде замкнутого сердечника. Из-за отсутствия воздушного зазора остаточная намагниченность может достигать 80 % [1] от предельно допустимой и в зависимости от уровня первичного тока может сохраняться более 8 ч [2]. В соответствии с IEC 600–44–1 полная погрешность указанных ТТ не должна превышать 10 % в установившемся режиме. Однако из-за отсутствия требований к остаточной намагниченности магнитопроводов ТТ класса Р как в переходных, так и в установившихся режимах сети может возникать насыщение. Так, существует анализ неселективной работы дифференциальной защиты шин, вызванной насыщением ТТ [3].

Кроме того, предложен метод компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения магнитопровода, который, однако, имеет высокую чувствительность относительно начальной магнитной индукции [4]. В целях избегания этого недостатка предлагается использовать модификацию такого метода с помощью прогнозирования [5; 6].

Основным недостатком этих подходов является зависимость от точности получения первого прогнозного отсчета. Апробация таких методов показала, что при наличии шума в измеренных отсчетах вторичного тока прогнозное значение сильно искажается, что негативно влияет на эффект компенсации [7].

В рамках настоящей работы предложен метод снижения погрешности ТТ при насыщении магнитопровода, вызванного периодической составляющей первичного тока.

Сущность предложенного метода заключается в линейной аппроксимации участка синусоидального сигнала, что позволяет получить амплитуду A и начальную фазу φ_0 :

$$i = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

В точки пересечения оси времени, используя следующую модель, можно найти A и φ_0 :

$$i_{\text{расчет}} = kt + b. \quad (2)$$

В предложенной модели неизвестными являются коэффициенты k и b , которые находятся с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и измеренных отсчетов модели (1). При определении коэффициентов необходимо, чтобы исходные данные для МНК были выбраны симметрично относительно нуля, чтобы первая часть измеренных

отсчетов находилась в положительной области модели (1), а вторая — в отрицательной.

Таким образом, зная k и b , (3) и (4), можно найти A и φ_0 :

$$A = \frac{k}{\omega}; \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{-kt_0}{A}, \quad (4)$$

где t_0 — момент времени, соответствующий $i = 0$.

Для проверки надежности метода относительно зашумленного сигнала был добавлен шум:

$$i = A \sin(\omega t + \varphi_0) \cdot (1 + \delta \vartheta), \quad (5)$$

где δ — априорно заданное значение уровня зашумления эталонного тока на основе оценки зашумленности в цепях измерений; ϑ — случайное число в диапазоне от -1 до $+1$, ϑ имеет нормальное (равномерное) распределение.

Результат работы метода при $\delta = 3\%$ приведен в таблице. При определении коэффициентов (2) производилась вариация количество измеренных отсчетов от $N = 3$ до $N = 10$. Амплитуда и начальная фаза модели (1) для упрощения анализа результатов расчета были приняты $A = 1$ и $\varphi_0 = -90^\circ$.

Таблица

Результаты расчета при $\delta = 3\%$

N	$A_{\text{эталон}}$	$A_{\text{расчет}}$	$\varphi_{\text{эталон}}$	$\varphi_{\text{расчет}}$
20–22	1	1,0039	–90	–90,309
19–23	1	0,9803	–90	–88,184
18–24	1	0,9991	–90	–89,877
17–25	1	0,9905	–90	–89,107
16–26	1	0,9866	–90	–88,746

Для наглядности работы метода на рис. 1 представлены кривые эталонного, измеренного и восстановленного токов при количестве измерений $N = 5$. Уровень шума задавался $\delta = 10\%$. Согласно рисунку, возникновение насыщения магнитопровода ТТ происходит в 50 % от амплитуды эталонного тока.

В рамках настоящего исследования предложен новый метод компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что метод относительно за-

шумленности измеренного сигнала является робастным и достаточно точно определяет параметры синусоидального сигнала, с учетом указанных ранее допущений. Так, например, при возникновении насыщения на уровне 50 % от амплитудного значения и наличия шума, равного $\delta = 10 \%$, относительные погрешности A и φ_0 составляют 0,51 и 0,56 % соответственно (рис. 1).

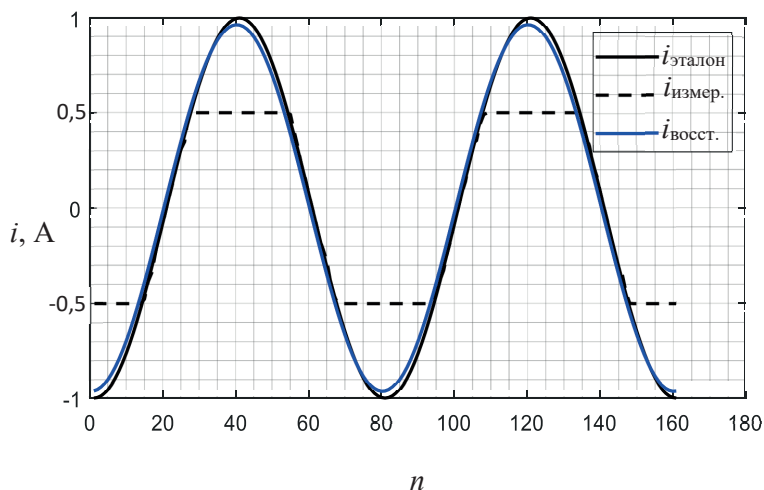


Рис. 1. График зависимости кривых эталонного, измеренного и восстановленного токов от количества отсчетов n

Существует множество факторов, которые оказывают влияние на возникновение насыщения магнитопроводов ТТ, одним из которых является вторичная нагрузка. В случае наличия большой вторичной нагрузки магнитопровод ТТ может насытиться в установившемся режиме. Тогда применение метода может стать основным инструментом, который позволит избежать влияния насыщения магнитопровода ТТ на корректность функционирования систем релейной защиты и автоматики электроэнергетических объектов.

В ходе вычислительных экспериментов выяснилось, что для корректного определения параметров модели (1) необходимым условием является наличие отсчета в малых окрестностях перехода через нулевое значение. Выполнение этого условия можно обеспечить путем повышения частоты дискретизации сигнала. В рамках настоящей работы частота дискретизации была задана равной 80 точек/период, что позволило получить отсчет, близкий к переходу через ноль.

Список источников

1. Ziegler G. Digital Differential Protection. Belo Horizonte, 2005. 314 p.
2. Раскулов Р. Ф. Погрешности ТТ. Влияние токов короткого замыкания // Новости электротехники. 2005. № 2 (32). С. 114–16.
3. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе [Электронный ресурс] / С. Л. Кужиков [и др.] // Релейная защита. 2019. № 1. С. 28–36. URL: <https://ekra.ru/upload/iblock/522/statya-1.pdf> (дата обращения: 07.12.2020).
4. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic resource] / Y. C. Kang [et al.] // IEEE Transactions power delivery. 1997. Vol. 12, Iss. 1. P. 116–124. DOI: 10.1109/61.568231 (date of access: 07.12.2020).
5. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic resource] / Y. C. Kang [et al.] // IEEE Transactions power delivery. 2004. Vol. 19, Iss. 4. P. 1642–1649. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835266 (date of access: 07.12.2020).
6. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays [Electronic resource] // IEEE Trans. Power Deliv. 2015. Vol. 30, Iss. 5. P. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736 (date of access: 07.12.2020).
7. Анализ математических методов снижения погрешности ТТ в режиме насыщения [Электронный ресурс] / И. Н. Одинаев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18 (дата обращения: 07.12.2020).

УДК 62-712

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В. С. Поздняков¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ mail.slava.ru@yandex.ru

Аннотация. Проведен сравнительный анализ способов повышения энергоэффективности аппаратов воздушного охлаждения природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Показано, что наиболее энергоэффективным решением является применение частотного привода вентиляторов аппаратов охлаждения.

Ключевые слова: аппараты воздушного охлаждения, природный газ, энергоэффективность, вентилятор, частотное регулирование

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AIRCOOLING DEVICES FOR COMPRESSOR STATIONS OF MAIN GAS PIPELINES

V. S. Pozdnyakov¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ mail.slava.ru@yandex.ru

Abstract. A comparative analysis of the ways to improve the energy efficiency of natural gas air coolers at compressor stations of main gas pipelines is carried out. It is shown that the most energy-efficient solution is the use of a frequency drive of the cooling apparatus fans.

Keywords: air coolers, natural gas, energy efficiency, fan, frequency regulation

Самая большая в мире протяженность магистральных газопроводов РФ (175,2 тыс. км) определяет значительное количество

линейных компрессорных станций (254 шт.) и газоперекачивающих агрегатов (ГПА) (4253 шт.) в составе компрессорных цехов (748 шт.).

Компримирование газа ГПА — одна из основных операций при транспортировке природного газа по магистральным газопроводам, которая сопровождается повышением его температуры, и, как следствие, уменьшением пропускной способности газопровода, снижением эксплуатационной надежности начального участка газопровода и увеличением расхода газа на собственные нужды компрессорной станции. По этой причине в составе установок охлаждения газа (УОГ) применяют аппараты воздушного охлаждения (АВО) компримированного газа, вентиляторы которых потребляют 60–70 % (и более) общего электропотребления на его транспорт, что сказывается на показателях экономической деятельности линейных компрессорных станций.

Высокая затратность воздушного охлаждения, не имеющего альтернативы в силу географических и климатических факторов в зонах размещения газопроводов, требует энергоэффективных решений по эксплуатации АВО газа [2]. Повышение эффективности работы установок, осуществляющих охлаждение компримированного газа, является важным фактором экономии топливно-энергетических ресурсов, способствующим снижению себестоимости магистрального транспорта газа.

Тепловая мощность АВО газа определяется такими факторами, как расход и температура технологического газа после компримирования, степень загрязнения поверхности теплообменников и температура наружного воздуха. Для заданного режима транспорта газа первые три фактора могут рассматриваться как постоянные в отличие от суточных и сезонных колебаний температуры наружного воздуха, непосредственно влияющих на процесс охлаждения газа. Для обеспечения изменения температуры технологического газа в заданных пределах требуется эффективное регулирование охлаждающего эффекта АВО. Это обычно достигается изменением расхода через АВО охлаждающего воздуха, зависящего от количества одновременно работающих вентиляторов, частоты вращения их рабочих колес и угла «атаки» лопастей.

Типовая технология охлаждения компримированного газа, основанная на дискретном изменении расхода воздуха за счет включения (отключения) осевых вентиляторов в сочетании с сезонной регулировкой угла «атаки» их лопастей, имеет ряд существенных недостатков.

В состав установки охлаждения газа входит 12 и более секций АВО с двумя электроприводными вентиляторами в каждой секции. При отключении одного из вентиляторов из-за конструктивных особенностей АВО часть нагнетаемого воздуха возвращается через неработающий вентилятор, вызывая рециркуляцию нагретого воздуха и ухудшая охлаждающую способность теплообменника. Рециркуляция воздуха оказывает негативное влияние на энергоэффективность процесса охлаждения газа, увеличивая потери электрической энергии и снижение КПД установки в целом.

При достаточной интенсивности потока возможно вращение колеса неработающего вентилятора в обратную сторону. Последующий прямой пуск приводного двигателя, вращающегося в противофазе, вызывает ударные электрические и механические пусковые нагрузки, многократно превышающие номинально допустимые для системы двигатель-вентилятор и снижающие ее эксплуатационный ресурс.

При характерных значительных сезонных изменениях температуры наружного воздуха в диапазоне от $+30$ до -45 °С существенно меняется плотность воздуха, что вызывает колебания потребляемой электродвигателем мощности до 30 %. Согласование потребляемой вентилятором и располагаемой электродвигателем мощности с учетом сезонных колебаний температуры достигается перестройкой углов установки лопастей вентиляторов весной и осенью. При этом регулировка в силу дискретности компенсирует влияние температуры на режим работы АВО лишь частично.

Типовая схема дискретного управления режимами работы АВО имеет следствием неточность поддержания температуры газа и вызывает нерациональные затраты электроэнергии, поскольку включение вентиляторов АВО, потребляющих электроэнергию, часто не приводит к заметному снижению температуры компримированного газа. Оптимизация режима работы АВО газа, эксплуатируемых в условиях переменных нагрузок и колебаний температуры, может быть достигнута только за счет плавного регулирования АВО при частотном регулировании электропривода [3; 4] вентиляторов. В последнем случае на фоне прогнозируемой экономии электроэнергии следует ожидать и улучшения охлаждения газа за счет исключения рециркуляции нагретого воздуха, т. к. при частотном регулировании в работе находятся оба вентилятора секции, имеющие сниженную частоту вращения.

Сравнение эксплуатационных данных плавного и дискретного типов регулирования [3] обнаружило достижение существенной экономии электроэнергии применительно к УОГ промплощадки линейно-производственного управления магистральных линий (ЛПУ МГ) ООО «Газпром трансгаз Югорск» во всем диапазоне регулирования АВО газа со снижением потребляемой мощности до 46 % при эквивалентном уровне охлаждения (рис. 1).

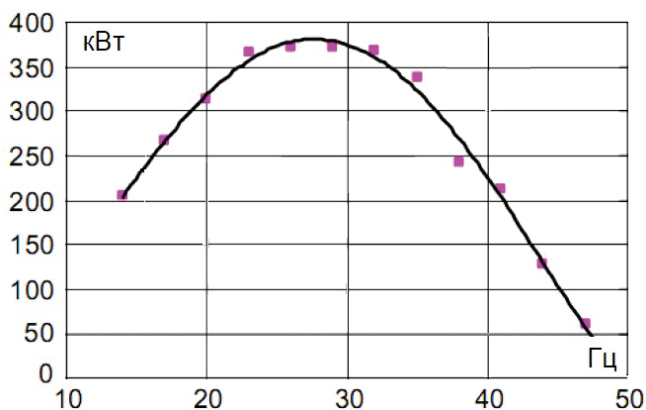


Рис. 1. Экономия потребляемой мощности электроприводами вентиляторов УОГ при частотном регулировании (построено по: [5])

УОГ состоит из 12 секций, единичная мощность электроприводов вентиляторов 37 кВт.

Вместе с тем следует отметить, что без замены существующих асинхронных двигателей на электроприводы серии АЧДР достижения такой экономии в долгосрочном плане ожидать не следует, поскольку снижение мощности стандартного привода при частотном регулировании более чем на 30 % ведет к перегреву обмоток и снижению ресурса, т. е. существует естественное ограничение по глубине регулирования снижением частоты вращения, которое может противоречить требуемой глубине охлаждения. Этот существенный эксплуатационный момент отмечается практически всеми ответственными производителями асинхронных двигателей.

По всей видимости, будет рациональным совместное использование частотного и дискретного регулирования, которое позволит энергетически эффективно управлять охлаждающей способностью АВО во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Следует отметить, что при этом многократное отключение вентиляторов при снижении нагрузки установки охлаждения не приведет к обычному снижению ресурса электропривода из-за высоких значений пускового тока, т. к. частотные регуляторы являются также устройствами плавного пуска, что расширяет область их эффективного применения.

Список источников

1. Крупников А. В., Ваняшов А. Д., Январев И. А. Анализ эффективности регулирования режимов работы аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях // Хим. и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 1. С. 20–23.

2. Алимов С. В., Лифанов В. А., Миатов О. Л. Аппараты воздушного охлаждения газа: опыт эксплуатации и пути совершенствования // Газовая пром-сть. 2006. № 6. С. 54–57.

3. Применение частотно-регулируемого электропривода вентиляторов в системах воздушного охлаждения компримированного газа / И. И. Аршакян [и др.] // Электроприводы переменного тока : тр. Междунаро-д. XIII науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 15–18 марта 2005 г.). Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. С. 289–292.

4. Аршакян И. И., Тримбач А. А. Повышение эффективности работы установок охлаждения газа // Газовая пром-сть. 2006. № 12. С. 52–55.

5. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И. И. Артюхов [и др.] // Вестник СГТУ. 2011. № 1 (54), вып. 3. С. 25–32.

УДК 621.592.3

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В ДЕТАНДЕРНОМ ОЖИЖИТЕЛЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГРС

С. Д. Ратманов¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ semensam77777@gmail.com

Аннотация. Проведен сравнительный анализ режимов работы детандерного ожижителя природного газа применительно к циклу среднего давления Клода. Численным моделированием в среде Aspen HYSYS рассчитан коэффициент ожижения при разных соотношениях продукционного и детандерного потоков применительно к условиям работы комплекса по производству СПГ на ГРС.

Ключевые слова: природный газ, ожижитель, детандер, энергоэффективность, детандерный поток, коэффициент ожижения

OPTIMIZATION OF FLOW DISTRIBUTION IN THE NATURAL GAS EXPANDER LIQUEFIER AT THE GAS DISTRIBUTION STATION

S. D. Ratmanov¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ semensam77777@gmail.com

Abstract. A comparative analysis of the operating modes of the natural gas expander liquefier is performed in relation to the Claude medium pressure cycle. Numerical modeling in the Aspen HYSYS environment has calculated the liquefaction coefficient for different ratios of production and expander flows in relation to the operating conditions of the LNG production complex at the gas station.

Keywords: natural gas, liquefier, expander, energy efficiency, expander flow, coefficient of liquefaction

В настоящее время при самой большой в мире протяженности магистральных газопроводов (175,2 тыс. км) и газораспределительных сетей (959,4 тыс. км) по состоянию на 1 января 2020 г. газифицировано 70,1 % территории РФ. Действующими программами газификации предусматривается развитие газоснабжения, в т. ч. способом беструбопроводной газификации регазифицированным сжиженным природным газом (СПГ), в первую очередь для решения задач теплоснабжения поселений за счет сжигания экологически чистого топлива и снижения себестоимости отпускаемой тепловой энергии. Такой подход к порядку формирования топливно-энергетических балансов определен в перечне поручений Президента РФ от 31 мая 2020 г. [1].

Немаловажно и перспективное в коммерческом плане применение СПГ в транспортном секторе, которое сокращает себестоимость грузоперевозок и существенно уменьшает выбросы автотранспорта в окружающую среду [2].

Ресурсная база СПГ в обоих случаях предполагает развитие малотоннажного производства, локализованного в соответствии с формируемыми методиками [3] в первую очередь на газораспределительных станциях (ГРС) магистральных газопроводов, в которых энергия вносится в установку ожижения комплекса по производству СПГ (КСПГ) за счет перепада давлений газового потока, компримированного в системе газокompрессорных станций самих магистральных газопроводов.

Вследствие того, что при детандерной технологической схеме КСПГ на ГРС, кроме тормозной ступени турбодетандера, отсутствует иное компрессорное оборудование, составляющее в структуре капитальных затрат альтернативных комплексов по производству СПГ до 40 % [4], себестоимость производимого по рассматриваемой технологии СПГ имеет минимальное возможное значение, что способствует масштабному внедрению КСПГ на ГРС в рамках развития инфраструктуры СПГ как энергетического и газомоторного топлива в регионах с развитой сетью магистральных газопроводов.

Отсюда вытекает задача оптимизации режимов работы энергоэффективных детандерных ожижителей природного газа, работающих практически без затрат энергии по циклу среднего давления Клода и реализующих потенциал перепада давлений между магистральными и распределительными сетями.

В настоящее время в России два комплекса малотоннажного производства СПГ на ГРС используют детандерную технологию: КСПГ ГРС-4 в Екатеринбурге и КСПГ ГРС-3 в Магнитогорске.

Наибольший опыт эксплуатации накоплен на ГРС-4 ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» (комплекс производительностью 3 т/ч СПГ), в котором проектное распределение продукционного и детандерного потоков составляет 13 и 87 % соответственно.

Известно, что относительная величина детандерного потока является ключевым фактором повышения коэффициента ожижения и, следовательно, производительности ожижителя природного газа [5].

В связи с этим была поставлена задача численным методом с использованием ресурса программного комплекса Aspen HYSYS исследовать возможность увеличения производительности ожижителя за счет оптимизации соотношения продукционного и детандерного потоков применительно к производственным условиям комплекса на ГРС-4.

Расчет выполнен для зимнего периода эксплуатации при номинальном расходе природного газа на входе в КСПГ $41071 \text{ м}^3/\text{ч}$ (28750 кг/ч), давлении $3,65 \text{ МПа}$, температуре $+1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расширение природного газа в турбодетандере в соответствии с расчетной схемой КСПГ (рис. 1) происходило в интервале давлений $3,1\text{--}0,7 \text{ МПа}$.

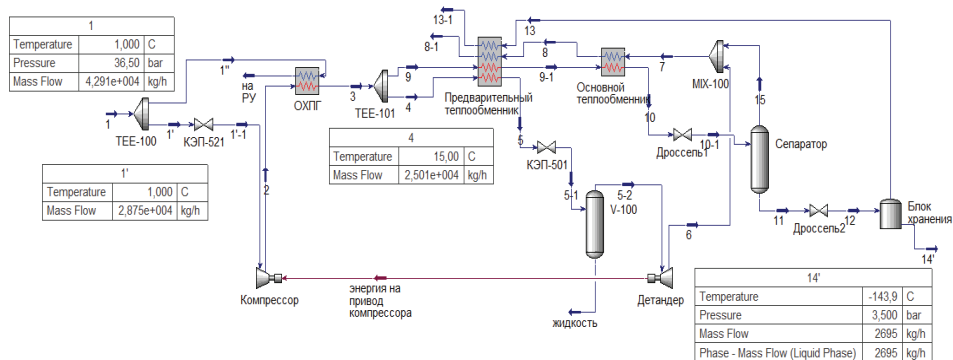


Рис. 1. Расчетная схема КСПГ на ГРС-4

В ходе численного эксперимента с использованием среды Aspen HYSYS доля продукционного потока изменялась в диапазоне от 12 до 15 % с постоянным шагом $0,1 \text{ \%}$.

Для каждого случая были определены расход СПГ на выходе из ожигателя и коэффициент ожигения. Точкой отсчета являлось значение доли продукционного потока в номинальном режиме работы КСПГ 13 % (рис. 2).

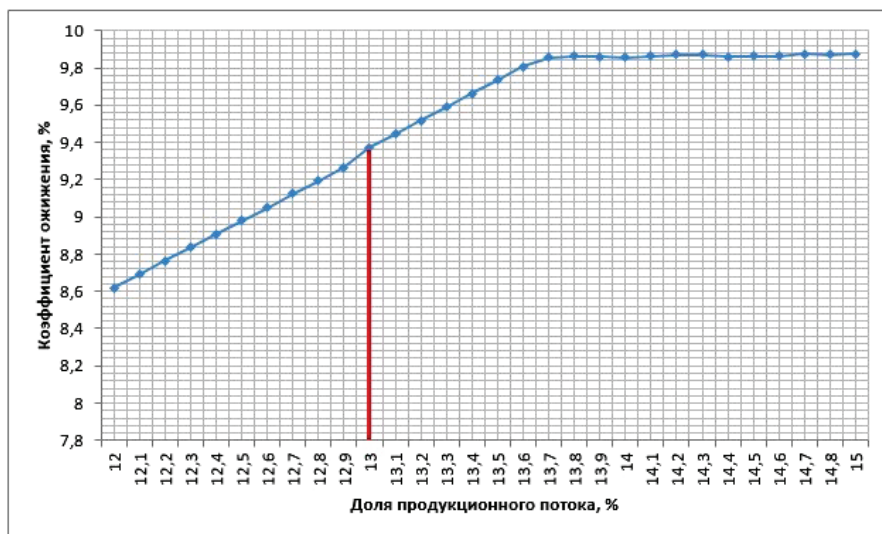


Рис. 2. Зависимость коэффициента ожигения от величины доли продукционного потока

Согласно расчетам (таблица) в эксплуатационном режиме при номинальном расходе природного газа и проектной доле продукционного потока 13 % КСПГ не обеспечивает проектной производительности по СПГ 3,0 т/ч.

Таблица

Данные расчетов

Доля продукционного потока, %	Расход газа на входе, кг/ч	Расход СПГ на выходе, кг/ч	Коэффициент ожигения, %
13,0	28750	2695	9,373913043
13,8	28750	2836	9,864347826

Выход СПГ на 11,3 % ниже паспортных характеристик ожигателя. В этих условиях целесообразно увеличить долю продукционного потока до 13,8 % с увеличением коэффициента ожигения на 5,23 % и выходом на производительность 2836 т/ч.

Полученный результат указывает на завышение доли детандерного потока при проектировании КСПГ и необходимость развернутого исследования влияния такого фактора во всем возможном диапазоне эксплуатационных параметров.

Дальнейшее увеличение выхода СПГ и достижение проектной производительности, по-видимому, возможно при понижении температуры детандерного и продукционного потоков за счет более глубокого охлаждения как полного потока природного газа в охладителе природного газа за блоком осушки КСПГ, так и детандерного потока в предварительном охладителе газа, тепловая эффективность которого в значительной степени зависит от загрязнения газа маслом при компримировании вследствие износа лабиринтных уплотнений турбокомпрессора при длительной эксплуатации.

Список источников

1. Перечень поручений Президента РФ по результатам проверки исполнения законодательства, направленного на развитие газоснабжения и газификации регионов [Электронный ресурс] // Президент России. Москва. 2020. 31 мая. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/63454> (дата обращения: 27.11.2020).
2. Расширение использования природного газа в качестве газомоторного топлива [Электронный ресурс]. URL: <http://gazpronin.ru/DraftNGVprogramRus.pdf> (дата обращения: 27.11.2020).
3. Методические подходы к формированию программ малотоннажного производства и использования сжиженного природного газа / С. П. Горбачёв [и др.] // Вести газовой науки. 2017. № 1 (29). С. 227–240.
4. Паркин А. Н. О выборе оптимальных параметров для детандерных схем установок сжижения природного газа на ГРС и для их основного технологического оборудования // Низкотемператур. и пищевые технологии в XXI веке : сб. материалов VII Международ. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 17–20 нояб. 2015 г.). Ч. I. СПб. : Ун-т ИТМО, 2015. С. 307–313.
5. Криогенные системы. Т. 2: Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А. М. Архаров [и др.] ; под общ. ред. А. М. Архарова, А. И. Смородина. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 719 с.

УДК 620.91

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВНУТРИ ТРУБОПРОВОДА ОТ ВРЕМЕНИ

М. С. Редунова¹, Е. Ю. Павлюк²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ M.Redunova@yandex.ru

Аннотация. В работе приведен результат решения стационарной задачи расхолаживания трубопровода, получена зависимость температуры теплоносителя внутри трубопровода от времени. Приведена постановка задачи в общем виде.

Ключевые слова: трубопровод, системы ГВС, расхолаживание, температурное поле

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE COOLANT TEMPERATURE INSIDE THE PIPELINE ON TIME

M. S. Redunova¹, E. Yu. Pavlyuk²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ M.Redunova@yandex.ru

Abstract. The paper presents the result of the solution of the stationary problem of pipeline cooling, and the dependence of the coolant temperature inside the pipeline on time is obtained. The problem is formulated in general form.

Keywords: pipe, hot water supply systems, cool-down, temperature field

Уровень температуры воды в системах централизованного горячего водоснабжения в местах водоразбора независимо от применяемой системы теплоснабжения должна быть не ниже 60 °С и не выше 75 °С [1]. Занижение установленной температуры может привести к появлению патогенных микроорганизмов, таких как легионелла

(*Legionella pneumophila*) [2]. Чтобы температура воды не достигала критических значений, необходимо провести расчет температурного поля в трубопроводе, демонстрирующего зависимость температуры теплоносителя от времени. Проведем расчет температурного поля для частного случая расхолаживания теплопровода после остановки циркуляции ($w = 0$). В этом случае динамика температуры теплоносителя в теплопроводе может быть рассчитана при следующих предположениях:

1) температура теплоносителя принимается постоянной по его объему, ограниченному внутренней поверхностью цилиндра радиуса R (приближение термически тонкого тела, $Bi \rightarrow 0$ ($Bi < 0,1$, $\alpha \rightarrow 0$);

2) температура окружающей теплопровод среды — заданная функция времени $T_{\text{ср}} = f(\tau)$, коэффициенты эффективности теплообмена с ограждениями — внутренней $\alpha_{\text{внутр}}$ и наружной $\alpha_{\text{наружн}}$ поверхностями принимаются постоянными;

3) расчет проводится на единицу длины теплопровода.

Тогда решение поставленной задачи находится из уравнения теплового баланса:

$$\frac{dT}{d\tau} = -\frac{\alpha_{\text{эфф}} F}{\rho C_p V} (T - T_{\text{ср}}),$$

где T — температура теплоносителя; τ — время; $\alpha_{\text{эфф}}$ — коэффициент теплоотдачи; F — площадь поверхности теплосъема; $T_{\text{ср}}$ — температура среды; ρ и C_p — плотность и теплоемкость теплоносителя; V — объем, занимаемый теплоносителем.

Путем несложных преобразований получим зависимость температуры теплоносителя от времени при $T_{\text{ср}} = \text{const}$:

$$T = T_{\text{ср}} + (T_0 - T_{\text{ср}}) e^{-m\tau},$$

где T_0 — температура теплоносителя в начальный момент времени; m — коэффициент, равный

$$m = \frac{2\alpha_{\text{эфф}}}{\rho C_p R}.$$

При переменной по времени температуре окружающей среды $T_{\text{ср}} = f(\tau)$ уравнение несколько усложняется

$$\frac{dT}{d\tau} = -m \cdot (T - f(\tau)).$$

Решение этого уравнения имеет вид [3]:

$$T = T_0 \exp[-m\tau] + m \int_0^\tau f(\zeta) \exp\{-m(\tau - \zeta)\} d\zeta.$$

В настоящее время решается задача определения длительности расхолаживания трубопровода, заполненного движущейся жидкостью. В этом случае задача реконструкции температурного поля в теплопроводе будет формулироваться следующим образом:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\vec{w} \nabla) T = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho C_p}.$$

Для стационарного осесимметричного течения среды вдоль оси полуограниченной круглой трубы при отсутствии тепловыделения внутри области течения приведенное выше уравнение теплопроводности приобретает вид:

$$T = T(r, z); \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; \vec{w} = (0, 0, w_z); q_v = 0;$$

$$w_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\}.$$

Постановка задач:

1) рассматривается стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе радиуса R ;

2) на входе в трубу имеется предвключенный изотермический участок гидродинамической стабилизации. Скорость потока равна w_{cp} . Жидкость поступает в трубу с равномерной температурой T_0 ;

3) поле скоростей на основном участке при ламинарном режиме течения описывается уравнением Пуазейля:

$$w(r) = w_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right];$$

$$w_{cp} = \frac{\Delta P}{8\mu l} R^2;$$

$$w_{\max} = 2 w_{cp};$$

4) поток тепла теплопроводности вдоль оси трубы пренебрежимо мал по сравнению с переносом тепла конвективным потоком жидкости;

5) поле температур в трубе определяется из решения следующей граничной задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_z(r) \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ T = T(r, z) \\ 0 \leq r \leq R \\ 0 \leq z \leq \infty \\ T|_{z=0} = T_0 \\ T|_{z \rightarrow \infty} = 0 \end{array} \right. ;$$

6) на боковой поверхности трубы реализуется граничное условие III рода. Температура внешней среды принимается равной нулю. Эффективный коэффициент теплоотдачи определяется с учетом термического сопротивления теплоотдачи от жидкости к внутренней стенке трубы, теплопроводности слоя изоляции и теплоотдачи с наружной поверхности в окружающую среду:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r_{r=R}} = \alpha_{\text{эфф}} T_{r=R}.$$

Результаты проделанной работы имеют важное практическое значение, т. к. с их помощью можно определить температуру теплоносителя в точках водоразбора, а также допустимый временной интервал простоя воды в трубопроводе на случай сезонных гидравлических испытаний трубопроводов в системах ГВС.

Список источников

1. СП 30.13330.2020 «СНиП 2.04.01–85 Внутренний водопровод и канализация зданий» [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/117293/> (дата обращения: 12.04.2021).
2. Наука и молодежь: проблемы, поиски решения : тр. Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / СибГИУ ; под общ. ред. М. В. Темлянцева. Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. Вып. 20. Ч. V. Техн. науки. 223 с.
3. Цой П. В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М. : Энергоатомиздат, 1984. 412 с.

УДК 612.311.62

СЕТЕВЫЕ НАКОПИТЕЛИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В. П. Рыбальская

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

rybalskya@mail.ru

Аннотация. Качество электроснабжения является одним из ключевых компонентов надежности энергосистемы и зависит от множества параметров, поддержание которых в допустимых границах осуществляется с использованием различных устройств. К таким устройствам можно отнести сетевые накопители электроэнергии, которые способны выравнивать неравномерности подачи электроэнергии, выступать в роли бесперебойного источника питания, а также в роли аккумулятора энергии на случай аварийных ситуаций.

Ключевые слова: сетевые накопители, электрическая нагрузка, мощность

GRID ENERGY STORAGE IN POWER SUPPLY SYSTEMS

V. P. Rybalskya

Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

rybalskya@mail.ru

Abstract. The quality of power supply is one of the key components of the reliability of the power system, and depends on many parameters, which are maintained within acceptable limits using various devices. These devices include grid energy storage devices, which are able to equalize irregularities in the supply of electricity, act as an uninterruptible power supply, and also as an energy accumulator in case of emergencies.

Keywords: grid energy storage, electric load, power

Качество электроэнергии — важнейший показатель, оказывающий влияние на надежность работы самих систем энергоснабжения и их оборудования. Под качеством электроэнергии подразумевается степень соответствия параметров нормируемым значениям [1].

Однако, качество электроснабжения может снижаться при возникновении отклонения напряжения, частоты, значения коэффициента несинусоидальной кривой напряжения и (или) значения коэффициентов обратной и нулевой последовательности напряжения.

Снижение качества электроэнергии, в свою очередь, негативно влияет на надежность электроснабжения, работу энергосистемы в целом, работу оборудования системы, работу систем управления, автоматизации и диспетчеризации и т. д.

Важнейшим показателем нормальных режимов энергосистемы является значение уровня напряжения, поддержание которого в заданном диапазоне, обеспечивает качество подаваемой электроэнергии, надежность электроснабжения, а также экономичность работы.

К главным проблемам в электроэнергетических системах относятся:

- 1) рост неравномерности графиков нагрузки;
- 2) увеличение крутизны таких графиков;
- 3) превращение местных аварий в системные из-за сложного внутреннего устройства энергообъединений.

Одновременно с этим переменную часть графиков нагрузки зачастую невозможно покрыть применением агрегатов электростанций в условиях постоянной загрузки генераторов.

Для решения проблемы считается целесообразным применить нетрадиционный способ генерации, аккумулирования и распределения электроэнергии — установить сетевые накопители на участках энергосистемы [2].

К решающим преимуществам сетевых накопителей можно отнести их способность уплотнять графики нагрузки за счет маневренности оборудования. На рис. 1 [3] показана возможность их размещения на любом участке системы.



Рис. 1. Размещение сетевых накопителей в системе

В современной энергетике интеграция распределенных источников электроэнергии осложняется нерегулируемыми режимами работы оборудования, глобальной перестройки распределительных сетей, технического перевооружения. На фоне этого применение сетевых накопителей становится наиболее выигрышным вариантом резервирования мощностей.

Кроме ключевой функции — выравнивания графиков нагрузки, — к функциям сетевых накопителей электроэнергии можно отнести:

- 1) обеспечение пределов мощностей, передаваемых по линиям электропередачи;
- 2) обеспечение пределов динамической мощности, статической устойчивости режимов работы системы;
- 3) поддержание напряжения в выбранных точках энергосистемы;
- 4) регулирование мощностных обменных потоков между энергосистемами.

Накопители энергии имеют несколько режимов работы:

- 1) режим заряда — накопитель заряжается энергией электростанции во время провала графика;
- 2) режим разряда — накопитель выдает аккумулированную им энергию в сеть;
- 3) аварийный режим — ликвидация аварий, возникающих в связи с резкими изменениями нагрузки, отключения генераторов.

Расположение сетевых накопителей выбирается в зависимости от режимов работы. В режиме заряда на участке графика нагрузки заполняется провал. В режиме разряда, наоборот, уменьшается пик нагрузки.

За счет восполнения провалов и уменьшения пиков нагрузки графики суточной, недельной и годовой нагрузки выравниваются во всей системе и в отдельных узлах — в тех местах, где локализуются сетевые накопители.

Стоит отметить, что — несмотря на наличие традиционных способов устранения неравномерности нагрузок, регуляторов напряжения у потребителей для самостоятельного регулирования напряжения — такие способы покрытия пиковых и минимальных нагрузок оказывают негативное влияние на самих потребителей.

Применение сетевых накопителей помогает покрывать пиковые промежуточные и минимальные нагрузки за счет аккумулирования энергии в момент сглаживанию нагрузок, превышающих допустимые

значения, а также незамедлительной выдачи для покрытия провалов графиков нагрузок.

В настоящее время на рынке существует несколько видов сетевых накопителей, которые разделены на группы: механические, химические, электрические, тепловые и электрохимические [4]. Наиболее распространенным видом накопителей являются гидроаккумулирующие, которые относятся к группе механических.

Весомым преимуществом сетевых накопителей энергии является востребованность каждого их вида — в зависимости от сферы применения.

За счет своей компактности, маневренности, многообразия вариаций технического исполнения, сетевые накопители являются отличным решением для улучшения качества электроснабжения.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 304 с.
2. Анчарова Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. М. : Форум, 2018. 192 с.
3. Сидорович В. Введен в эксплуатацию крупнейший в мире накопитель энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://renen.ru/largest-lion-energy-storage-san-diego/> (дата обращения: 01.12.2020).
4. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 [Электронный ресурс] / под ред. А. А. Макарова, Т. А. Митровой, В. А. Кулагина. М. : ИНЭИ РАН ; Моск. шк. упр. СКОЛКОВО, 2019. 210 с. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (дата обращения: 01.12.2020).

УДК 621.311

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ СЕТИ, ОСНОВАННЫХ НА УЧЕТЕ ЗАТРАТ

Н. Ю. Сафонов¹, Г. С. Шабалин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Saffon1998@gmail.com

Аннотация. В статье представлено сравнение методов, статических приведенных и динамических дисконтированных затрат при сопоставлении вариантов развития сети. Для анализа технико-экономической эффективности в методе дисконтированных затрат, использовались различные расчетные модели. В работе применен критерий чистого дисконтированного дохода (ЧДД) для оценки технико-экономической эффективности вариантов развития сети. В ходе исследования показана чувствительность метода статических приведенных затрат к стоимости издержек на потери электроэнергии. Выявлено, что одноставочная и двухставочная модель определяют наиболее выгодный вариант для сетевых компаний, а модель дисконтированного денежного потока (ДДП) определяет наиболее выгодный вариант с точки зрения общесистемного эффекта.

Ключевые слова: статические приведенные затраты, динамические дисконтированные затраты, критерий чистого дисконтированного дохода, технико-экономическое сопоставление вариантов

COMPARISON OF METHODS FOR EVALUATING NETWORK DEVELOPMENT OPTIONS BASED ON COST ACCOUNTING

N. Yu. Safonov¹, G. S. Shabalin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Saffon1998@gmail.com

Abstract. The article presents a comparison of methods, static reduced costs, as well as dynamic discounted costs, when comparing options for network development.

To analyze the technical and economic efficiency in the discounted cost method, various calculation models were used. In the work, the criterion of net present value (hereinafter NPV) is applied to assess the technical and economic efficiency of the network development options. The study shows the sensitivity of the method of static reduced costs to the cost of costs for electricity losses. It was revealed that the one-rate and two-rate models determine the most profitable option for grid companies, and the discounted cash flow model determines the most profitable option in terms of the system-wide effect.

Keywords: static reduced costs, dynamic discounted costs, criterion of net present value, technical and economic comparison of options

Основными задачами проектирования электрических сетей являются разработка вариантов их развития, а также технико-экономическое обоснование. Рациональный выбор варианта позволяет минимизировать количество ресурсов при строительстве и эксплуатации сети. Помимо решения задачи ресурсосбережения, оптимально выбранный вариант позволяет получить более энергоэффективную сеть, т. к. учитывается немаловажный фактор минимизации потерь электроэнергии. Для анализа экономической эффективности вариантов в работе используются методы статических приведенных, а также динамических дисконтированных затрат.

При статической постановке задачи проектирования электрической сети затраты представляют собой распределенную в течение срока окупаемости проекта сумму капиталовложений, которые были внесены в проект до начала его эксплуатации, и издержек во время эксплуатации проекта. Выбор одного варианта из совокупности допустимых вариантов по экономическому критерию сводится к поиску варианта с минимальными статическими затратами [1].

Метод дисконтированных затрат позволяет учитывать поэтапный ввод капитальных вложений, а также изменение во времени стоимости сооружения объекта [2]. Помимо минимума суммарных дисконтированных затрат, в качестве критерия экономической эффективности какого-либо проекта используется такой показатель, как чистый дисконтированный доход (ЧДД) [3].

В зависимости от подхода к тарифообразованию на электроэнергию приток денежных средств может быть учтен тремя различными способами:

$$1) C_{(t)} = \left(\sum P k_{\text{нер. max}} \cdot C_{\text{Т. сод}} \cdot 12 + C_{\text{Т. пот}} \Delta \mathcal{E} - \mathcal{I} \right) \cdot (1 + \gamma)^{t-1},$$

где $t = [T_c; T]$, T_c — срок сооружения объекта, T — срок окупаемости объекта; $\sum P$ — суммарная сетевая мощность; $Ст_{\text{сод}}$ — ставка за содержание электрических сетей; $Ст_{\text{пот}}$ — ставка на оплату потерь в электрических сетях; $\Delta \mathcal{E}$ — годовые потери электроэнергии; $И$ — ежегодные эксплуатационные издержки; γ — коэффициент, учитывающий уровень инфляции в процентном соотношении;

$$2) C_{(t)} = (\sum P T_{\text{max}} \text{Од}_{\text{тар}} - И) \cdot (1 + \gamma)^{t-1},$$

где $\text{Од}_{\text{тар}}$ — одноставочный тариф;

$$3) C_{(t)} = (\sum P T_{\text{max}} \text{Од}_{\text{тар}} - И - \text{Оц}_{\text{пот}} \Delta P^* \tau) \cdot (1 + \gamma)^{t-1},$$

где ΔP^* — разность потерь мощности анализируемого варианта с вариантом с минимальными потерями мощности; $\text{Оц}_{\text{пот}}$ — экспертно-введенная оценка влияния потерь в сети на экономическую эффективность проекта.

Сравнение методов в работе производится на основании результатов заранее спроектированных сетей 110 кВ (табл. 1, рисунок) и 220 кВ (табл. 2) (ДДП — дисконтированный денежный поток).

Таблица 1

Итоговое сравнение вариантов развития сети 110 кВ

Поз.	Одноставочная модель		Двухставочная модель		Общесистемная модель	Метод статических приведенных затрат	
	ЧДД = 0, г.	ЧДД ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	ЧДД = 0, г.	ЧДД ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	ДДП ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	З*, отн. ед./г.; $\beta = 1,2$; (тыс. р.)/(МВт · ч)	З*, отн. ед./г.; $\beta = 2$; (тыс. р.)/(МВт · ч)
1	6	1384169	6	1067780	1345070	1,27	1,245
2	6	1487932	6	1171165	1453964	1,14	1,131
3	5	1615415	6	1298893	1578135	1,00	1,000
4	6	1388948	6	1069679	1388948	1,24	1,206

По результатам сравнения методов оценки вариантов развития сети (рис. 1) наблюдается чувствительность метода статических приведенных затрат к стоимости издержек на потери электроэнергии. Такой метод рекомендуется использовать для качественной оценки разработанных вариантов развития сети.

Для однозначного определения наиболее выгодного и рационального варианта сети предлагается использовать метод динамических дис-

континированных затрат с использованием критерия ЧДД. При этом при наличии в узлах проектируемой сети потребителей только III категории необходимо также учесть ущерб от перерывов электроснабжения.

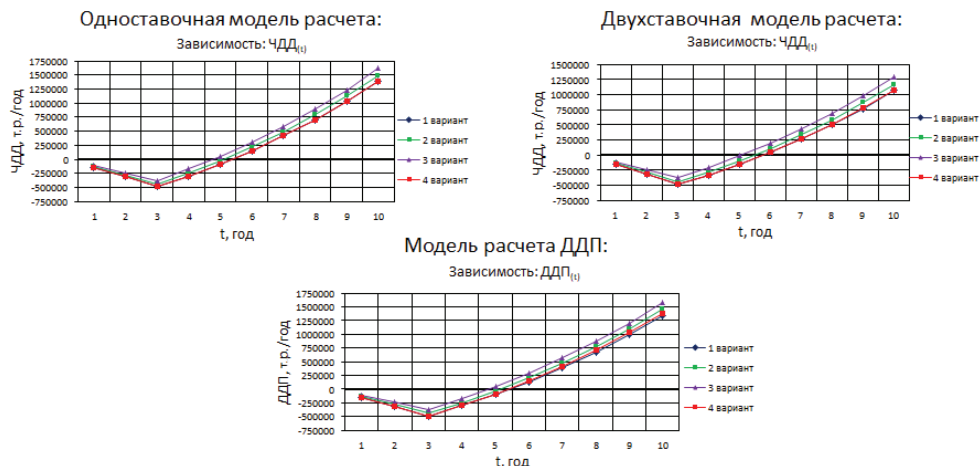


Рис. 1. Сравнение различных моделей расчета сети 110 кВ

Таблица 2

Итоговое сравнение вариантов развития сети 220 кВ

Поз.	Одноставочная модель		Двухставочная модель		Общесистемная модель	Метод статических приведенных затрат	
	ЧДД = 0, г.	ЧДД ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	ЧДД = 0, г.	ЧДД ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	ДДП ₍₁₀₎ , (тыс. р.)/г.	З*, отн. ед./г.; β = 1,2; (тыс. р.)/(МВт · ч)	З*, отн. ед./г.; β = 2; (тыс. р.)/(МВт · ч)
1	5	6922158	6	5585891	6758426	1,020	1,030
2	6	6667649	6	5332402	6496578	1,080	1,080
3	5	6967906	6	5626801	6863730	1,005	1,011
4	6	6941787	6	5593337	6941787	1,000	1,000

При использовании модели расчета ДДП учитывается разность потерь между вариантами, что позволяет оценить сеть с точки зрения энергоэффективности и технической составляющей, следовательно, метод динамических дисконтированных затрат позволяет наиболее точно ранжировать варианты развития сети, относимые к равно-экономичным. При применении метода динамических затрат и критерия ЧДД одноставочная и двухставочная модель показывают наибо-

лее выгодный вариант для сетевых компаний, а модель ДДП наиболее выгодный вариант с точки зрения общесистемного эффекта. Помимо этого, модель ДДП позволяет выбрать вариант с оптимальным потокораспределением, т. е. минимизировать потери, при этом снижаются затраты на передачу электроэнергии, увеличивается ресурс оборудования, тем самым повышается эффективность сети.

Таким образом, в статье описан подход к решению проблемы оптимального выбора варианта развития сети. Такой вариант развития обеспечивает наилучший баланс ресурсосбережения (минимизации капвложений) и энергосбережения (минимизации потерь).

Список источников

1. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М. : Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
2. Ананичева С. С., Котова Е. Н. Проектирование электрических сетей / науч. ред. С. Н. Шелюг. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 164 с.
3. Ананичева С. С., Мызин А. Л. Оценка сравнительной эффективности инвестиционных проектов методом интегральных приведенных затрат [Электронный ресурс] // Энергосистема, управление, конкуренция, образование : материалы III междунар. науч.-практ. конф., 13–16 окт. 2008 г., Екатеринбург, УГТУ-УПИ. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

УДК 697.341

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ «СТАРТ-ПРОФ» ПРИ РАСЧЕТЕ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ

А. П. Симушин¹, Е. А. Бирюзова²

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ alexey_simooshin@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы надежности и долговечности трубопроводов наружных тепловых сетей. Определяется актуальность и возможность применения специализированного программно-вычислительного комплекса.

Ключевые слова: теплоснабжение, надежность, тепловые сети, «Старт-Проф»

APPLICATION OF THE “START-PROF” SYSTEM FOR STRENGTH ANALYSIS OF PIPELINES OF HEATING NETWORKS

A. P. Simushin¹, E. A. Biryuzova²

^{1,2} Saint-Petersburg State University of architecture
and civil engineering, Saint-Petersburg

¹ alexey_simooshin@mail.ru

Abstract. This article discusses the issues of reliability and durability of pipelines of external heating networks. The relevance and the possibility of using a specialized software and computing complex is determined.

Keywords: heat supply, reliability, heating networks, “Start-Prof”

Теплоснабжение — это комплекс устройств, предназначенных для централизованного обеспечения тепловой энергией зданий и сооружений различного назначения. Система состоит из трех основных частей: источник тепла (котельная, теплоэлектроцентраль — ТЭЦ), транспортирующие устройства (тепловые сети), потребители (кало-

риферы, технологические установки). Надежность каждой единицы этой цепи крайне важна, т. к. при выходе из строя одного элемента работа остальных частей невозможна или не имеет смысла.

При проектировании, а также во время эксплуатации во избежание аварий на тепловых сетях, которые происходят часто даже в наше время (особенно при пиковых нагрузках на систему в зимний период) необходимо выполнять расчет трубопроводов на прочность и вычислять усилия, действующие на трубопровод и все элементы тепловой сети. Вычисляют напряжения, возникающие в углах поворота и других элементах, тепловые удлинения участков для подбора компенсаторов. В совокупности все эти расчеты представляют собой достаточно трудоемкий и сложный процесс.

В наше время большим прорывом в этой области стало создание системы «Старт-Проф» от компании «НТП Трубопровод». Разработчики являются авторами нормативных документов [1; 2]. Комплекс позволяет:

1) разработать редактируемую модель тепловой сети (пример модели показан на рис. 1);

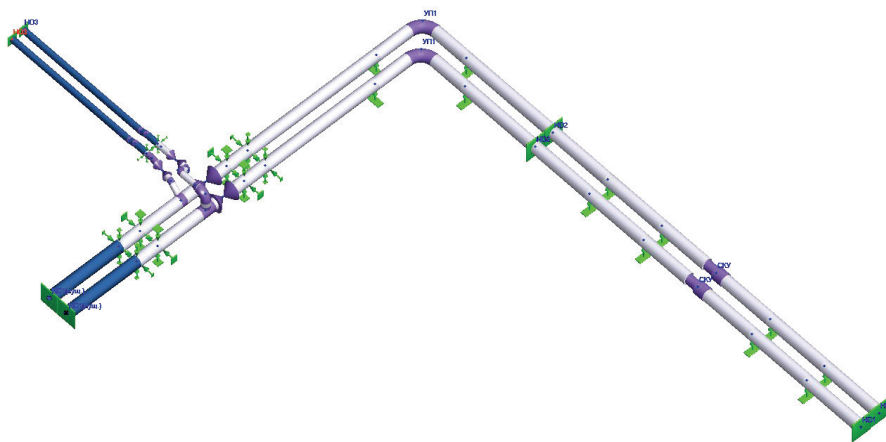


Рис. 1. Модель тепловой сети

2) выполнить расчет трубопроводов на жесткость и прочность, с определением напряжения в элементах теплопроводов;

3) выполнить расчет удлинений участков и усилий, действующих на неподвижные опоры в холодном и рабочем состоянии (т. е. при нагреве до расчетных температур теплоносителя);

4) увеличить время наработки оборудования до возникновения аварийной ситуации в случае возникновения напряжения, превышающего максимально допустимые значения.

После окончания расчета можно просмотреть его результаты: если напряжения превышают допустимые, эти ячейки выделяются красным цветом. Результаты расчета приведенной тепловой сети представлены на рис. 2.

Элемент	Начальный конечный узел	Напряжения от силовых воздействий в рабочем состоянии, (кгс/кв.см)		Напряжения от всех воздействий в рабочем состоянии, (кгс/кв.см)		Напряжения от всех воздействий в холодном состоянии, (кгс/кв.см)		Размах напряжений, (кгс/кв.см)		Примечание
		расч.	доп.	расч.	доп.	расч.	доп.	расч.	доп.	
Отвод крутоизогнутый	35, Ду200	251.49	1590.60	535.67	4491.56	155.90	Нет	1636.34	4419	
Воздушный участок	35, Ду200	275.69	1590.60	651.96	2169	60.98	2250	649.50	4419	
	36, Ду300-Ду200	275.64	1590.60	652.83	2169	59.91	2250	650.29	4419	
Переход концентрический	36, Ду300-Ду200	276.11	1590.60	519.22	4491.56	139.15	Нет	1579.28	4419	
Воздушный участок	36, Ду300-Ду200	214.45	1590.60	1444.17	2169	129.37	2250	1359.39	4419	
	37, Ду200	212.27	1590.60	1591.92	2169	73.26	2250	1521.20	4419	
Отвод крутоизогнутый	37, Ду200	221.08	1590.60	1214.25	4491.56	177.46	Нет	4643.98	4419	4
Воздушный участок	37, Ду200	211.76	1590.60	756.34	2169	58.69	2250	902.18	4419	
	38, Ду200	213.85	1590.60	587.77	2169	53.04	2250	726.29	4419	

Рис. 2. Результаты расчета тепловой сети

Максимально допустимые напряжения в различных элементах тепловой сети зависят от множества факторов, например диаметра трубопровода, толщины стенки, материала, а также типа, вида и толщины применяемой теплоизоляции.

Кроме этого, решающее влияние на всю систему оказывают температурный график, рабочее давление и давление при испытаниях [3].

При расчете систем теплоснабжения в «Старт-Проф» у специалистов также есть возможность предусматривать влияние коррозии на трубопроводы и устанавливать требуемый срок эксплуатации проектируемой тепловой сети.

Учесть все возникающие усилия на систему теплоснабжения при расчете вручную по существующим методам [4] достаточно сложно, а в некоторых случаях становится практически невыполнимым техническим процессом и вызывает множество сомнений, вопросов и споров среди специалистов проектных, строительно-монтажных и теплоснабжающих организаций и — главное — специалистов промышленной экспертизы, которые проверяют правильность выполнения проектных решений.

В этом случае система «Старт-Проф» приходит на помощь современным инженерам, ускоряя процесс расчета на прочность тепловых сетей [5; 6], а отчет о полученных результатах может служить документом, т. к. «Старт-Проф» имеет соответствующие свидетельства и сертификаты.

Список источников

1. ГОСТ Р 55596—2013. Сети тепловые. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия. М. : Стандартинформ, 2014. 76 с.
2. ГОСТ 32388—2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. М. : Стандартинформ, 2016. 109 с.
3. Рубцова К. А, Бирюзова Е. А. Современные методы расчета на прочность трубопроводов и оборудования систем горячего водоснабжения многоэтажных зданий // Наука вчера, сегодня, завтра. 2017. № 7 (41). С. 81—85.
4. Справочник проектировщика: проектирование тепловых сетей / под ред. А. А. Николаева. М. : Стройиздат, 1965. 361 с.
5. РД 10-400-01. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей [Электронный ресурс]. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. «Кодекс». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200021662> (дата обращения: 10.12.2020).
6. Методическое обеспечение расчета на прочность и назначенного ресурса трубопроводов / В. А. Осипов [и др.] // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 2—2 (24). С. 32—42.

УДК 669.162.253

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА

Н. Р. Тазеев¹, В. С. Антонова², К. Х. Шайхитдинова³, М. С. Соколова⁴

^{1,2,3,4} Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

¹ naitazeev@mail.ru

Аннотация. В работе представлены основные характеристики работы котельного агрегата «Ганомег» (станционный № 4) Центральной электростанции Магнитогорского металлургического комбината (ЦЭС ММК). Определены основные факторы, влияющие на удельный расход топлива по котельным агрегатам. Проведен анализ изменения удельного расхода условного топлива на станционном котле № 4 в зависимости от его паропроизводительности.

Ключевые слова: паровой котел, природный газ, доменный газ, удельный расход топлива

STUDY OF THE INFLUENCE OF STEAM PRODUCTIVITY OF A BOILER UNIT ON SPECIFIC FUEL CONSUMPTION

N. R. Tazeev¹, V. S. Antonova², K. H. Shaykhidinova³, M. S. Sokolova⁴

^{1,2,3,4} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ naitazeev@mail.ru

Abstract. The paper presents the main characteristics of the operation of the boiler unit “Ganomag” (station number 4) of the Central Electric Power Station of PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”. The main factors influencing the specific fuel consumption for boiler units are determined. The analysis of changes in the specific consumption of equivalent fuel at the station boiler № 4, depending on its steam capacity.

Keywords: steam boiler, natural gas, blast furnace gas, specific fuel consumption

Сокращение потребления энергоресурсов для Магнитогорского металлургического комбината (ММК) относится к наиболее важным задачам его устойчивого развития.

Потребление топлива в каждом подразделении комбината определяется набором производственных, технологических и организационных факторов. При этом необходимо, чтобы принимаемые к рассмотрению факторы можно было определить не только качественно, но и количественно [1; 2].

Эффективное управление потреблением энергоресурсов на металлургическом предприятии возможно только в том случае, когда основные закономерности, присущие объекту, представлены в виде математического описания, а в его математической модели присутствуют основные факторы, влияющие на потребление топлива в каждом подразделении (цехе) [3].

Анализ изменения удельного расхода топлива от различных факторов рассмотрен на базе Центральной электростанции (ЦЭС) ММК, в т. ч. на примере котельного агрегата «Ганомег» (станционный № 4), основными составными частями которого являются:

- 1) пароперегреватель — двуступенчатый вертикально-змеевиковый смешанного типа с поверхностным пароохладителем на насыщенной стороне и впрыскивающим пароохладителем на выходе из котла;
- 2) водяной экономайзер — гладкотрубный горизонтально-змеевиковый двухступенчатый кипящего типа;
- 3) воздухоподогреватель — трубчатый, двухступенчатый;
- 4) топка — камерная полностью экранированная с холодной воронкой, активный объем — 588 м³.

Также на котле установлено два вида горелок, предназначенных для сжигания природного и доменного газов.

Анализ показал, что к предполагаемым факторам, влияющим на удельный расход топлива на котле «Ганомег» (станционный № 4) ЦЭС ММК следует отнести [4; 5]:

- 1) долю доменного газа в топливной смеси (с природным газом);
- 2) давление, температуру и среднечасовой расход пара;
- 3) среднечасовой расход воздуха;
- 4) производительность котельного агрегата.

В таблице представлены расчетные удельные расходы условного топлива на котле «Ганомег» и его КПД в зависимости от производительности (паровой нагрузки) [6], а также в зависимости от различной доли доменного газа в топливной смеси.

Таблица

Удельный расход условного топлива на котле «Ганомег»
в зависимости от его производительности

Нагрузка котла	Расход доменного газа, тыс. м ³ /ч					
	20		60		100	
	КПД	Удельный расход условного топлива	КПД	Удельный расход условного топлива	КПД	Удельный расход условного топлива
т/ч	%	(кг у. т.)/Гкал	%	(кг у. т.)/Гкал	%	(кг у. т.)/Гкал
90	90,3	158,2	87,3	163,7	—	—
110	91,7	155,8	88,7	161,0	—	—
130	91,9	155,5	89,6	159,5	86,3	165,5
150	92,3	154,7	90,3	158,3	86,0	164,6
165	92,6	154,2	90,8	157,4	87,7	162,9

На рис. 1 представлена диаграмма зависимости удельного расхода условного топлива и КПД от паропроизводительности котла «Ганомег» ЦЭС ММК.

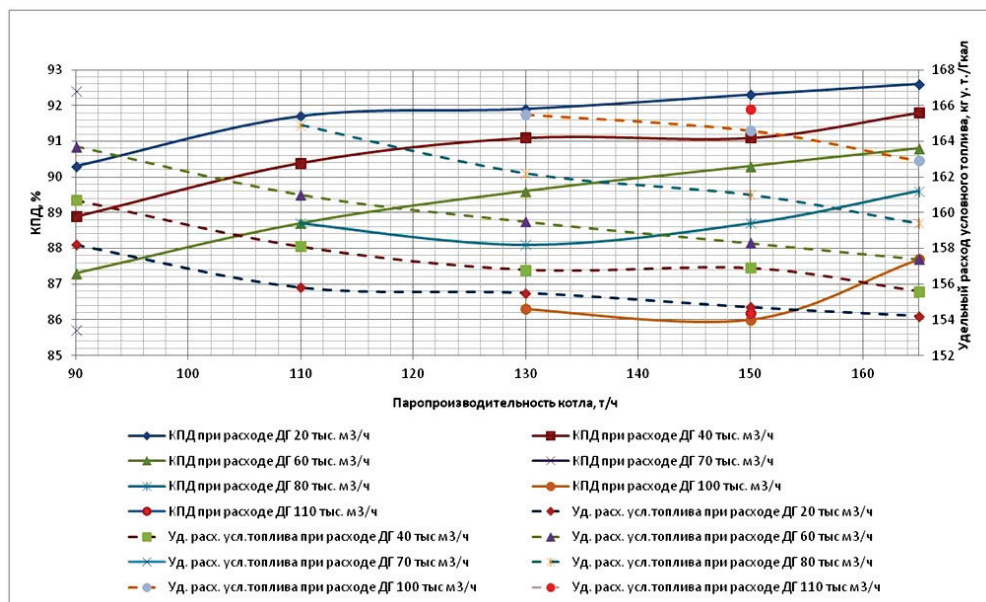


Рис. 1. Зависимость удельного расхода условного топлива от паропроизводительности котла «Ганомег» ЦЭС ПАО «ММК»

Таким образом, технические данные режимных карт (производительность) позволяют оценить удельные расходы топлива наработку пара котлоагрегатом при работе в различных режимах. Однако номинальный режим работы котельного агрегата «Ганомат» является пределом, к которому необходимо стремиться в процессе совершенствования рабочих режимов, т. к. именно в этом случае наблюдается максимальное значение КПД котла при минимальном расходе условного топлива. При этом количество доменного газа в топливной смеси может определяться текущим состоянием производственных мощностей предприятия.

Список источников

1. Копцев Л. А., Япрынцева И. А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» // Промышленная энергетика. 2004. № 5. С. 2–6.
2. Казаринов Л. С., Копцев Л. А., Япрынцева И. А. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургических предприятиях // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия: Компьютер. технологии, управление, радиоэлектроника. 2007. № 7 (79). С. 24–26.
3. Агапитов Е. Б., Соколова М. С., Агапитов А. Е. Техничко-экономический анализ эффективности использования ВИЭ при переменной нагрузке // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тез. докл. 76-й Международ. науч.-техн. конф. Магнитогорск : Изд-во Магнитог. гос. ун-та им. Г. И. Носова, 2018. С. 288–289.
4. Техничко-экономические подходы к оценке эффективности использования доменного газа на металлургическом предприятии / Е. Б. Агапитов [и др.] // Промышл. энергетика. 2016. № 3. С. 15–22.
5. Повышение эффективности работы паровоздуходувной электростанции металлургического предприятия при решении многоцелевых задач / Е. Б. Агапитов [и др.] // Электротехн. системы и комплексы. 2016. № 3 (32). С. 48–53.
6. The study of the influence of the volume use of the secondary energy resources for electricity generation at TBS power plant of metallurgical enterprise [Electronic resource] / E. B. Agapitov [et al.] // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. St. Petersburg. SPb. : Electrotechnical University “LETI”, 2017. P. 1467–1470. DOI: 10.1109/ElConRus.2017.7910851 (date of access: 07.11.2020).

УДК 62-621.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ

М. В. Трушков¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ maxtr5@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности технологического процесса малотоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ) по детандерной технологии на базе ГРС-4 (Екатеринбург), отмечены проблемы работы блока подготовки природного газа: адсорберов осушки и адсорберов очистки. Составлена схема комплекса по производству СПГ в программном комплексе Aspen HYSYS.

Ключевые слова: малотоннажное производство СПГ, детандерная технология, подготовка природного газа, адсорбер

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF LOW-TONNAGE LNG PRODUCTION AT GAS DISTRIBUTION STATIONS

M. V. Trushkov¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ maxtr5@mail.ru

Abstract. The features of the technological process of low-tonnage LNG production using expander technology based on gas distribution station are considered. Operation problems of the natural gas treatment unit — desiccation adsorbers and purification adsorbers — are noted. The scheme of the LNG production complex in the Aspen HYSYS software package has been drawn up.

Keywords: low-tonnage LNG production, expander technology, natural gas treatment, adsorber

Внесение изменений в порядок формирования топливно-энергетических балансов с учетом потребности населения в сжиженном природном газе (СПГ) в соответствии с поручениями Президента РФ от 31 мая 2020 г. в первую очередь предполагает использование ресурсной базы малотоннажного производства СПГ, ориентированного как на производство моторного топлива, так и на последующую регазификацию СПГ для целей теплоснабжения поселений и бытового потребления.

Программа развития малотоннажного производства в соответствии с существующей методикой [1] ориентирована на преимущественное использование детандерной технологии, основанной на цикле среднего давления Клода. Такая технология используется двумя существующими комплексами по производству СПГ (КП СПГ): при ГРС-4 (Екатеринбург) производительностью 3 т/ч и ГРС-3 (Магнитогорск) производительность 5 т/ч.

КП СПГ в Екатеринбурге ориентирован на производство моторного топлива для железнодорожного транспорта, а в Магнитогорске — для муниципального. Однако оба комплекса также имеют целью газификацию поселений, как удаленных от сетей газораспределения, так и не имеющих возможности технологического присоединения к ним в силу того, что газораспределительные станции (ГРС) «заперты», т. е. не имеют резерва мощности. К таковым, например, в Челябинской области относятся 16 из 105 имеющихся ГРС.

Эксплуатационным опытом располагает только один из КП СПГ в Екатеринбурге (начало эксплуатации 2011 г.). КП СПГ в Магнитогорске запущен 26 августа 2020 г.

Детандерные технологии находятся в стадии освоения и несмотря на накопленный девятилетний опыт требуют изучения режимных характеристик, в первую очередь детандер-компрессорного агрегата, что достигается численным экспериментом в программном комплексе Aspen HYSYS.

С помощью Aspen HYSYS разработана модель существующего комплекса по производству СПГ на ГРС-4 в Екатеринбурге (рис. 1) для последующего анализа режимов его работы с учетом опыта эксплуатации КП СПГ и данных расчетов блока подготовки газа в модуле Aspen Adsorption.

Блок подготовки природного газа КП СПГ состоит из блока осушки и блока очистки природного газа.

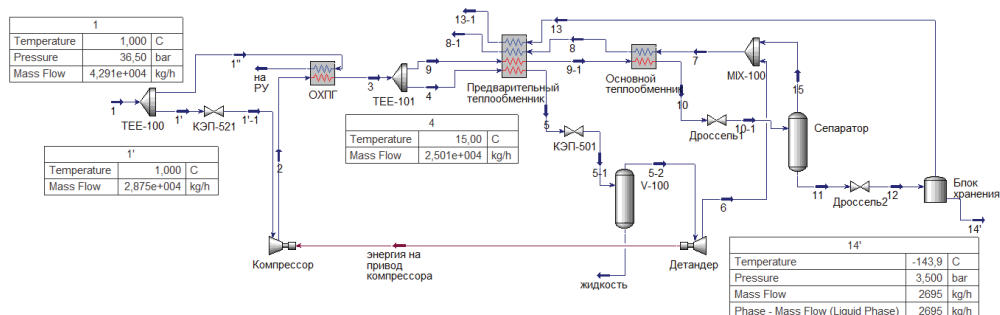


Рис. 1. Расчетная схема КП СПГ на ГРС-4

Блок осушки включает в себя два попеременно работающих адсорбера, блок арматуры, четыре фильтра-сепаратора; он предназначен для осушки природного газа до остаточного содержания воды $0,00204 \text{ г/м}^3$, что соответствует точке росы около -75°C . Первоначально в состав блока осушки входил также узел вакуумного насоса, поскольку по предварительному проекту регенерация адсорбента должна была проводиться в режиме термовакuumирования. Однако в последствии от этого технического решения отказались, и в настоящее время регенерация производится по стандартной схеме с использованием части сжатого природного газа, прошедшего блок осушки. При этом для термической регенерации адсорберов осушки газом с расчетной температурой 350°C применяется тот же нагревательный узел, что и для регенерации блока очистки.

Адсорбер осушки представляет собой аппарат осевого типа и имеет габариты адсорбционного слоя: диаметр — 1,4 м; высота — 4,9 м. В адсорбер засыпается около 3,4 т цеолита.

Блок очистки включает в себя два попеременно работающих адсорбера, блок арматуры, блок обратных клапанов и блок фильтрации, предназначенный для очистки природного газа от диоксида углерода до остаточного содержания 50 ppm CO_2 . При этом габариты адсорберов аналогичны адсорберам осушки, а их адсорбционный слой включает в себя слой цеолита и вышележащий слой фарфоровых шаров тех же размеров, что и в адсорберах осушки.

Систематическое определение концентрации диоксида углерода в очищенном газе непосредственно после блока очистки ранее практически не производилось, однако присутствие CO_2 в больших количествах в готовой продукции (СПГ в сборнике-хранилище), которое

неоднократно фиксировалось лабораторными исследованиями, позволяет сделать вывод о том, что блок очистки функционирует неудовлетворительно.

В настоящее время проблема обостряется качеством цеолитов и постоянным повышением содержания CO_2 в магистральном газе: текущее содержание CO_2 превышает таковое на момент ввода КП СПГ в эксплуатацию в 6 раз.

Качество подготовки природного газа определяет качество конечного продукта — СПГ, регламентируемое ГОСТ Р 56021–2014 [2]. В связи с этим представляется необходимым анализ качества подготовки газа в модуле Aspen Adsorption.

Список источников

1. Методические подходы к формированию программ малотоннажного производства и использования сжиженного природного газа / С. П. Горбачёв [и др.] // Вести газовой науки. 2017. № 1(29). С. 227–240.
2. ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2019. 12 с.

УДК 620.9

ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ

Е. Е. Тыбанова¹, З. Р. Муфтахутдинова²

^{1,2} Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

¹ tybanova99@mail.ru

Аннотация. Рассматривается актуальность объемно-планировочных решений жилого фонда в России. Анализируется влияние архитектурных приемов, форм, площадей и этажности здания на его энергоэффективность. Приводятся наилучшие формы здания, конструкционные приемы и соотношения длины и ширины помещения.

Ключевые слова: энергоэффективность здания, объемно-планировочные решения, теплопотери, энергосбережение

SPACE-PLANNING MEASURES FOR ENERGY-SAVING

E. E. Tybanova¹, Z. R. Muftahutdinova²

^{1,2} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

¹ tybanova99@mail.ru

Abstract. The article is devoted to relevance of space-planning decisions, which exists in housing stock of Russia. More than that it is dedicated to influence of architectural methods and building's characteristics (shape, area and number of floors of building) for its energy performance of building. The article contains examples of best building's shapes, constructional techniques and length-to-width ratio of rooms.

Keywords: energy performance of building, space-planning decisions, heat losses, energy-saving

Жилищный фонд в России крайне неэффективен с точки зрения использования энергии. При проектировании энергоэффективного здания конечный результат достигается путем оптимизации объемно-планировочных решений зданий, улучшения теплозащитных свойств зданий, использования нетрадиционных источников тепла, а также выбора тех или иных систем отопления и регулирования.

При проектировании и выборе объемно-планировочного решения полагается обосновывать величины и соотношение некоторых планировочных параметров: ширина и длина здания, периметр наружных стен, количество этажей, площадь наружного корпуса, приходящаяся на единицу развернутой площади здания либо на единицу объема. Эти показатели используются для теплотехнической оценки объемно-планировочных решений.

Выбор формы здания является одним из конструктивных решений для строительства энергосберегающего дома. С точки зрения теплосбережения наиболее иррациональную конфигурацию имеют современные жилые здания, являющиеся основой строительства городов: большая поверхность ограждающих конструкций и узкий корпус приводят к чрезмерным тепловпотерям этих зданий. Прямоугольник и квадрат — формы, имеющие минимальное соотношение площади наружных стен к внутренней площади (за исключением круга). Эта форма дома минимизирует количество потенциальных мостиков холода — углов, а также уменьшит потенциальные потери тепла до 30 % без ущерба для жилого пространства [1].

В последние годы в зарубежной и отечественной практике проектирования и строительства получили популяризацию многоэтажные дома атриумного типа. Атриум позволяет значительно увеличить ширину здания и является своего рода «тепловой батареей». По предварительным расчетам такая компактная конструкция дома может снизить до 35 % тепловпотерь по сравнению с типовыми жилыми зданиями такой же этажности, а с установкой солнечных коллекторов — снизить затраты на отопление до 75 % [2].

Оптимальной компактностью характеризуются дома с широким корпусом. Такие дома позволяют минимизировать потери тепла за счет улучшения коэффициента компактности, микроклимат в них менее подвержен «продуванию» ветром, охлаждению квартир, а значит, и более устойчив.

Стоит рассмотреть вопрос о строительстве жилых домов с внутренним расположением лестнично-лифтового комплекса, а не с размещением лестничной клетки у наружной стены с привычным естественным освещением. Такая техника позволила бы увеличить используемый световой фронт непосредственно для квартир, что также увеличило бы количество квартир на этаже и изменило бы отношение периметра наружных стен к ограждаемой площади. Кроме того, это позволит сни-

зять теплопотери в здании благодаря устранению бесконтрольного отапливаемого пространства, каким является лестничная клетка в современных жилых домах.

Сохранению тепла может поспособствовать использование градостроительного приема «замкнутых» дворов для укрытия от ветра, шума дорог и улиц.

В качестве планировочного решения, которое повысит комфорт жизни и обеспечит сохранение тепла в помещении, можно рекомендовать рациональное соотношение ширины и длины помещения — 1 : 1,4 (1,6), вместо традиционного соотношения 1 : 2. Доказано, что способность квадратной в плане комнаты противостоять наружным тепловым воздействиям уменьшается наполовину по сравнению с глубоким помещением. В вытянутом помещении температурный режим улучшается, но при этом ухудшается вентиляция и естественная освещенность [2].

Изрезанные фасады, ризалиты, выступы, эркеры и другие подобные приемы значительно снижают тепловую эффективность жилого дома. В результате затраты на отопление такого здания могут увеличиться на 12–15 % по сравнению со зданием с плоским фасадом.

Для повышения теплоэффективности жилых зданий целесообразно применять такие архитектурные приемы, как ориентация здания по сторонам света с учетом преобладающих направлений холодного ветра, максимальное остекление южных фасадов и минимальное остекление северных фасадов [3].

Из-за больших окон летом в доме может стать слишком жарко. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем применения специального покрытия для стекол, а также использования свесов крыш, автоматических систем затемнения, балконов. Их расположение необходимо выбрать таким образом, чтобы прохождение прямых солнечных лучей через окна было возможно только при низком положении солнца зимой. Летом окна на солнечной стороне дома затеняют деревья. В зимнее же время солнечный свет легко проникает в дом между голыми ветвями.

Немаловажную роль играет и этажность зданий. Многоэтажные дома (более 17 этажей) подвержены воздействию мощных вихревых потоков, в результате чего возникают дополнительные нагрузки на конструкции, а в самом здании — неблагоприятная ситуация с точки зрения воздушного режима и микроклимата в квартирах [4].

Таким образом, объемно-планировочные решения жилых домов существенно влияют на их энергоэффективность. Учет всех предлагаемых в настоящей работе решений при разработке таких мероприятий может способствовать значительному повышению уровня энергетической эффективности здания, а также качественному улучшению условий проживания людей.

Список источников

1. Как форма здания влияет на его тепловые потери [Электронный ресурс]. URL: <http://term.od.ua/blog/teplopoteri-i-forma-doma/> (дата обращения: 18.11.2020).
2. Береговой А. М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания. М. : Изд-во АСВ, 1999. 160 с.
3. Дмитриев А. Н. Управление энергосберегающими инновациями. М. : Изд-во АСВ, 2000. 320 с.
4. Матросов Ю., Бутовский И. Энергоэффективность зданий. Критерии и технические решения (часть II) [Электронный ресурс]. URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/280> (дата обращения: 18.11.2020).

УДК 62-621.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСТРУБОПРОВОДНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПОСЕЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПГ

Е. В. Тюрин¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ eugenetul@yandex.ru

Аннотация. Выполнен анализ технологических возможностей беструбопроводной газификации поселений природным газом с использованием ресурсной базы малотоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ) на газораспределительных станциях (ГРС) и регазификационных комплексах.

Ключевые слова: беструбопроводная газификация, природный газ, малотоннажное производство, СПГ, регазификационный комплекс

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF PIPELINE-FREE GASIFICATION OF SETTLEMENTS USING LNG

E. V. Turin¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ eugenetul@yandex.ru

Abstract. The analysis of technological possibilities of pipeline-free gasification of settlements with natural gas using the resource base of low-tonnage LNG production at GDS and regasification complexes is performed.

Keywords: pipeline-free gasification, natural gas, low-tonnage production, LNG, regasification complex

Перечнем поручений Президента РФ от 31 мая 2020 г. [1] по результатам проверки исполнения законодательства, направленного на развитие газоснабжения и газификации регионов, предусмотрено

внесение изменений в порядок формирования топливно-энергетических балансов с учетом потребности населения в сжиженном природном газе (СПГ). Это продиктовано тем, что при самой большой в мире протяженности магистральных газопроводов (175,2 тыс. км) и газораспределительных сетей (959,4 тыс. км) газифицировано только 70,1 % территории РФ. В определенном отношении ситуация связана с наблюдаемой ограниченностью ресурсной базы газоснабжения РФ, поскольку из 4045 газораспределительных станций (ГРС) 447 являются «запертыми», т. е. отсутствует возможность технологического присоединения к подключенным к ним сетям газораспределения.

Так, в Челябинской области в настоящее время из 105 ГРС на 16-ти производительность исчерпана, что затрудняет выход на целевой показатель региональной программы газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций Челябинской области на 2017–2021 гг., в паспорте которой запланировано достижение уровня газификации населенных пунктов не менее 74,8 %.

Однако наличие резерва на других ГРС может служить ресурсной базой для газоснабжения удаленных потребителей в случае организации при ГРС малотоннажных производств СПГ на перепаде давления между магистральным трубопроводом и сетями газораспределения, когда производство холода с использованием детандеров осуществляется практически без внешних затрат энергии.

Отсутствие потребности в компримировании газа снижает капитальные затраты на КСПГ и сводит энергетические, следовательно, и эксплуатационные затраты комплексов этого типа к минимуму по сравнению с альтернативными схемами получения СПГ. Отсюда и методические подходы [2] к определению структуры ресурсной базы, предполагающие организацию малотоннажного производства преимущественно на ГРС магистральных газопроводов.

В настоящее время в России два комплекса малотоннажного производства СПГ на ГРС используют подобную (детандерную) технологию, и один из них с производительностью 5 т/ч расположен в Магнитогорске (Челябинская область) при ГРС-3, являющейся источником газоснабжения крупного потребителя с устойчивым графиком потребления — Магнитогорского металлургического комбината (ММК). Строительство комплексов производства СПГ и перевод котельных на регазифицированный СПГ являются составной частью программы газификации области.

Однако решение проблемы газификации удаленных потребителей выходит за рамки энергоэффективного малотоннажного производства СПГ [2], поскольку дополнительно ставит вопросы о создании как транспортной инфраструктуры (доставка СПГ автомобильным транспортом), так и комплексов регазификации СПГ на месте потребления (котельные, бытовой сектор). Существенен вопрос выбора энергоэффективного и надежного оборудования для регазификации, обеспечивающего требуемый расход газа в соответствии с графиком потребления.

В этом ряду ключевыми технологическими объектами, несомненно, являются атмосферные регазификаторы СПГ, использующие, в силу криогенных температур теплоносителя, теплоту окружающей среды.

Оптимизация затрат на атмосферные регазификаторы достигается использованием пакетов труб с продольным непрерывным оребрением. Наибольшую практическую ценность представляют конструкции оребрения, обеспечивающие максимум переноса теплоты при минимуме гидравлического сопротивления.

Максимальный результат достигается при использовании продольного разрезного оребрения, в частности Y-образного, представленного на рис. 1 [3].



Рис. 1. Атмосферный испаритель с Y-образным оребрением труб

Использование такого оребрения труб позволяет существенно улучшить габаритные и весовые показатели теплообменных устройств за счет увеличенного коэффициента оребрения. Небольшой рост гидравлического сопротивления по сравнению с прямыми ребрами при малых скоростях воздушного потока при естественной конвекции не оказывает в этом случае существенного влияния на теплогидравлическую эффективность регазификатора СПГ.

Производительность криогенных атмосферных испарителей зависит от характеристик поступающего сжиженного газа, требований к паровой фазе, эксплуатационных условий: температуры окружающего воздуха, относительной влажности, высоты, уровня солнечной радиации, а также близости к смежным конструкциям. В криогенной технике в силу влажности окружающего атмосферного воздуха имеет место инееобразование на рабочих поверхностях испарителей, в резервуарах и трубопроводах кратковременного действия, дренажных коммуникациях. Инееобразование сказывается на интенсивности теплообмена регазифицируемого СПГ с атмосферным воздухом, приводя по мере роста слоя инея к снижению производительности теплообменника.

Проектирование регазификаторов невозможно без знания и учета влияния характеристик инея на эффективность, габаритные и производственные показатели регазификационных установок.

Слой инея, образующийся в процессе эксплуатации на поверхности оребренных регазификаторов, во-первых, действует как тепловой изолятор, снижает интенсивность передачи теплоты через оребренную поверхность, а во-вторых, сужает живое сечение для прохода воздуха. Оба фактора обуславливают уменьшение производительности установки и необходимость периодической очистки поверхностей теплообмена. В результате имеет место простой теплообменного оборудования, а в некоторых случаях и дополнительные затраты энергии, что приводит к удорожанию вырабатываемого продукта.

С учетом актуальности вопроса оценки эффективности атмосферных регазификаторов проведен расчет испарителя СПГ с продольным типом оребрения в условиях инееобразования с использованием методики [4], результаты представлены в табличной форме (зависимость коэффициента теплопередачи k ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) регазификатора от времени):

часы	0	1	2	3	4	5
k	3,727	3,360	3,076	2,954	2,888	2,852

Расчетные параметры: давление СПГ — 6 бар; температура СПГ на входе в регазификатор — 137 °С; температура воздуха — 30 °С.

Как следует из табличной формы, коэффициент теплопередачи k в процессе уменьшается, и пропорционально падает выход продукционного газа, т. е. криосадок существенным образом влияет на производительность атмосферных испарителей, которую при проектировании следует выбирать с запасом. В случае низкого влагосодержания, характерного для наиболее ответственного зимнего периода эксплуатации испарителей, следует учитывать разрушение слоя инея до плотной основы изморози с периодичностью 2 ч при поверхности осыпания до 90 % полезной площади тепло- и массообмена [4].

Представляется, что существующая методика [4] требует уточнения в целях использования во всем возможном диапазоне эксплуатационных параметров. Верификация методики может быть выполнена, например, с использованием программного комплекса Ansys.

Список источников

1. Перечень поручений Президента РФ по результатам проверки исполнения законодательства, направленного на развитие газоснабжения и газификации регионов (31 мая 2020 года) [Электронный ресурс] // Президент России. Москва. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/63454> (дата обращения: 27.11.2020).
2. Методические подходы к формированию программ малотоннажного производства и использования сжиженного природного газа / С. П. Горбачёв [и др.] // Вести газовой науки. 2017. № 1 (29). С. 227–240.
3. Испарители [Электронный ресурс] // Компания «ДИОКСИД». URL: <https://dioksid.ru/ispariteli/> (дата обращения: 27.11.2020).
4. Маринюк Б. Т., Королев И. А. Особенности формирования и динамики роста инея на теплообменных поверхностях криогенного оборудования // Холодильная техника. 2017. № 11. С. 38–41.

УДК 621.182-5

ПРЕИМУЩЕСТВА УСТАНОВКИ КОАКСИАЛЬНЫХ ДЫМОХОДОВ В КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ С ЗАКРЫТОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

Г. А. Ульянов¹, Н. В. Колпакова²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ uga979797@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено применение коаксиальных дымоходов в котельных агрегатах с закрытой камерой сгорания при условии их установки в каждой квартире многоэтажных жилых домов. Выполнен анализ эксплуатации коаксиальных дымоходов в зимний период. Выбрана оптимальная конструкция коаксиального дымохода.

Ключевые слова: коаксиальный дымоход, закрытая камера сгорания, конденсат, котельные агрегаты

ADVANTAGES OF INSTALLATION COAXIAL FLUES IN BOILER UNITS WITH A CLOSED COMBUSTION CHAMBER

G. A. Ulianov¹, N. V. Kolpakova²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ uga979797@mail.ru

Abstract. The application of coaxial flues in boiler units with a closed combustion chamber, which installed in each apartment of multi-storey residential buildings, is considered. The analysis of the operation of coaxial chimneys in the winter period is carried out. The optimal design of the coaxial chimney has been chosen.

Keywords: coaxial chimney, closed combustion chamber, condensate, boiler units

Рассмотрим установку коаксиальных дымоходов в многоквартирных жилых домах с учетом размещения котельных агрегатов с закрытой камерой сгорания в каждой квартире. Как известно,

забор необходимого количества воздуха на горение осуществляется вне помещения непосредственно в топочное устройство за счет давления разрежения. Чтобы котел с закрытой камерой для сгорания функционировал полноценно, ему понадобится дымоход коаксиального типа.

Конструктивно коаксиальный дымоход представляет собой систему из двух труб, вложенных одна в другую. Чтобы их центральные оси совпали между собой, поверхности труб соединяются перемычками, удерживающими их в нужном положении.

Внутренний контур предназначен для отвода продуктов сгорания, через внешний осуществляется поступление воздуха в камеру сгорания (рис. 1). Поступление кислорода нужно для максимально полного сжигания топлива, что значительно увеличивает КПД котла и снижает вредность выбросов в атмосферу [1].

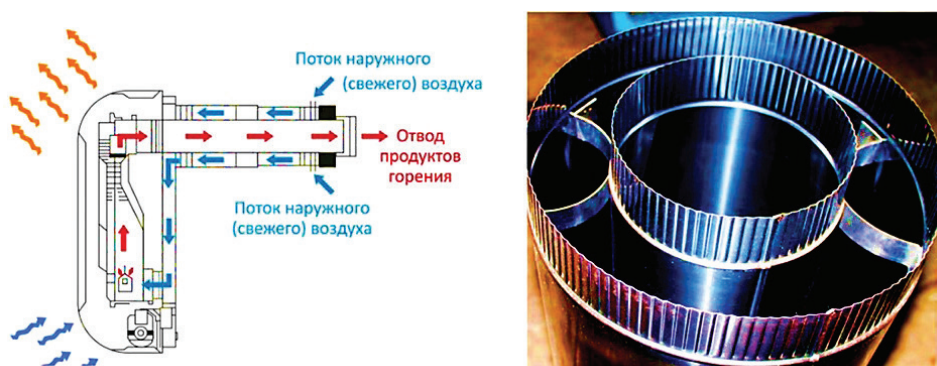


Рис. 1. Устройство коаксиального дымохода

Проходя по внешнему каналу, холодный уличный воздух нагревается от внутренней трубы дымохода, по которой идут дымовые газы. Благодаря этой конструкции в камеру сгорания поступает горячий воздух, что значительно повышает КПД. Нагреваясь от внутренней трубы, воздух наружного канала одновременно охлаждает ее, предотвращая перегревание. Такая особенность обеспечивает длительный срок службы.

У коаксиальных дымоходов есть проблема выпадения конденсата на поверхности внутренней трубы, предназначенной для поступления наружного воздуха. Такая проблема становится особенно острой

в холодный период года. В связи с этим конденсат застывает и образует ледяные наросты, которые могут привести к закупориванию приточного отверстия дымохода [1]. В холодный период года количество влаги меньше, чем в теплый период, поэтому избыточная влага кристаллизуется и выпадает в виде снегообразной массы. Образование влаги в зимний период обусловлена конструкцией коаксиального дымохода (рис. 2).

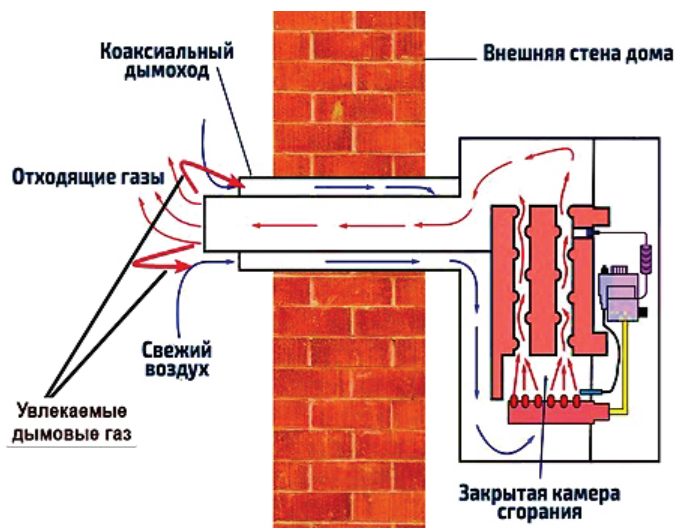


Рис. 2. Движение дымовых газов и подача свежего воздуха в процессе эксплуатации коаксиального дымохода

Основные компоненты продуктов сгорания газа: двуокись углерода, пары воды, окись углерода и т. д. При малой длине трубы для дымовых газов часть из них может увлекаться за потоком приточного воздуха.

Рассмотрим пример. Температура наружного воздуха -25°C , влажность 30 %. Температуру дымовых газов с влажностью 15 % примем $+57^{\circ}\text{C}$. Отметим точкой Д — параметры дымовых газов, а точкой Н — параметры наружного воздуха [1; 2].

Исходя из $i-d$ диаграммы, линия смешения дымовых газов с наружным воздухом сопровождается выпадением конденсата.

Решение проблемы заключается в удлинении трубы с дымовыми газами, чтобы исключить возможность подмешивания их в поступающий воздух с улицы (рис. 3).

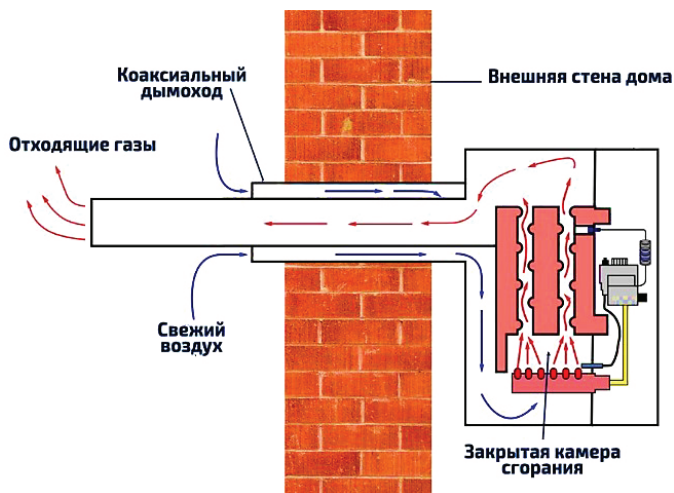


Рис. 3. Конструкция коаксиального дымохода с удлинением трубы отвода дымовых газов

Исходя из изложенного, можно сделать следующие выводы:

- 1) установка коаксиальных дымоходов позволяет экономить топливо за счет повышения КПД оборудования;
- 2) при максимально полном сгорании газа в атмосферу выделяется меньшее количество вредных веществ;
- 3) нет необходимости использования принудительной вентиляции; имеется возможность использования для многоквартирных жилых зданий с высотой в несколько этажей;
- 4) конструкция коаксиального дымохода с удлинением трубы отвода дымовых газов устраняет проблему подмешивания наружного воздуха, предотвращая образование конденсата.

Список источников

1. Коаксиальный дымоход для двухконтурного газового котла [Электронный ресурс] // Универсал. URL: <https://fefflues.ru/blog/kak-vybrat-dymokhod/ustroystvo-koaksialnogo-dymokhoda-dlya-gazovogo-kotla-chto-eto-takoe-i-kak-pravilno-ustanovit/> (дата обращения: 06.12.2020)
2. Диаграмма влажного воздуха [Электронный ресурс] // Компания Арктика. URL: <http://www.arktika.ru/technote/i-d> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 621

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ПАРОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Ю. А. Фазылова¹, Е. Ю. Павлюк²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ juliya190499@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы состояния трубопроводов высокого давления, выявления дефектов и применения вероятностных методов для определения периодичности контроля.

Ключевые слова: техническое состояние, выявление дефектов, частота контроля, математическая модель

ON THE ISSUE OF AVERAGE RUNTIME INVESTIGATION OF STEAM PIPE AT THERMAL POWER PLANT

Yu. A. Fazylova¹, E. Yu. Pavlyuk²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ juliya190499@mail.ru

Abstract. The paper considers some problems connected with state of high-pressure steam pipelines, defects identifying processes and usage of probability methods to determine the frequency of control.

Keywords: technical condition, identification of defects, control frequency, mathematical model

В современной технике одним из важнейших вопросов является определение надежности и долговечности машин и аппаратов. В технике основным критерием, обеспечивающим эти параметры, является прочность узлов и деталей их конструкций, надежность их работы, определяемая не только формой и размерами элементов конструкций, но и материалами, из которых эти элементы изготавливались.

Вопросы контроля состояния металла трубопроводов хорошо проработаны в настоящее время. Имеются нормативно-технические документы, которые регламентируют периодичность и объем контроля металла, гарантирующие работоспособность трубопроводов в течение их практического использования. Путем увеличения частоты контроля металла можно выявлять практически все повреждения, но это экономически неэффективно и трудоемко. По этой причине определение рекомендуемых сроков для проведения исследований подобного рода является актуальным и необходимым для нормального функционирования трубопроводов. Для этого необходимо учитывать оптимальную периодичность контроля и вероятность безаварийной работы трубопровода. В таких случаях строится математическая модель. Она позволяет получить математическое описание процесса накопления усталостных дефектов металла и дефектов соединений трубопроводов. Модель представляет собой описание изменений состояния оборудования в процессе межремонтного цикла.

В работе В. В. Степанова и В. Ю. Пришедко приведен перечень дефектов трубопровода горячего промперегрева (ГПП) энергоблока гидрорециркуляционной электростанции (ГРЭС) [1]. Трубопровод ГПП предназначен для транспортировки пара от котлоагрегатов энергоблока к турбоагрегату. Параметры пара: $T = 545^{\circ}\text{C}$, $P = 2,75 \text{ МПа}$. Трубопровод изготовлен из труб типоразмеров 426×18 , 377×17 , 273×11 марки стали 12Х1МФ. Трубопровод состоит из 491 элемента. Сварных соединений из них 248 шт., угловых — 92 шт.

Согласно перечню дефектов трубопровода [1] можно заметить, что из 15 выявленных дефектов 10 — это усталостные трещины, а оставшиеся 5 — дефекты сварки. Как показали исследования ремонтных карт трубопровода, самым повреждаемым элементом трубопровода стали угловые сварные соединения.

В процессе эксплуатации трубопроводы подвергаются воздействию циклических нагрузок от внутреннего давления и перепадов температур. Кроме того, необходимо учитывать наличие остаточных напряжений, возникающих при ремонтных подварках. Эти напряжения при растопке котла способствуют деформации труб вследствие термомеханических напряжений в сварных швах (рис. 1).

На момент выявления пятнадцатого дефекта общая наработка на момент контроля составила 254283 ч. Межконтрольный промежуток в соответствии с требованиями нормативно-технической доку-

ментации составляет 50 тыс. ч. Требования были выполнены, но это не смогло предотвратить появление дефектов. С 1962 по 2006 гг. было выявлено 15 дефектов.

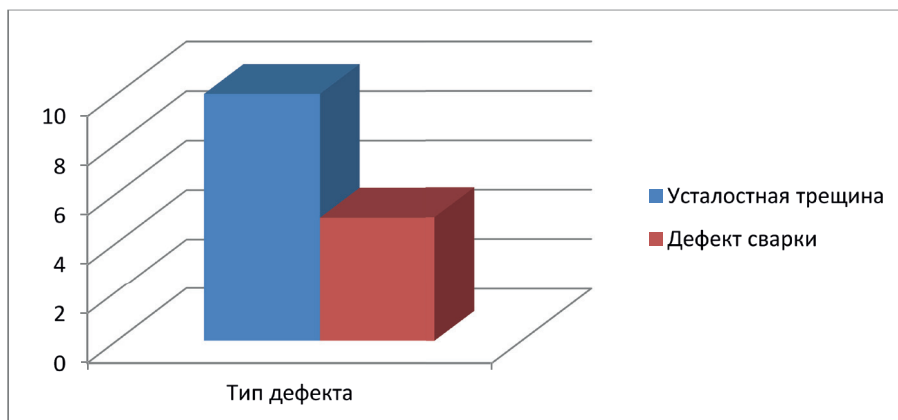


Рис. 1. Количественная оценка дефектов трубопроводов

Для того чтобы обеспечить уменьшение количества выявленных дефектов трубопровода, необходимо знать его фактическое состояние. Фактическая трассировка трубопровода должна соответствовать проектной, т. к. расчет на прочность произведен именно по ней. При несоответствии фактического исполнения трассировки выполняется поверочный расчет на прочность. Также нужно обеспечить наличие необходимого пространства для свободных тепловых перемещений трубопровода. На основании данных перечня дефектов можно рассчитать интенсивность отказов. Тогда интенсивность отказов λ рассчитывается по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t N_{\text{ср}}},$$

где $n(t)$ — число отказов; $N_{\text{ср}}$ — среднее число исправно работающих элементов.

Зная продолжительность контроля сварных соединений, можно проанализировать вероятность готовности к работе трубопровода. Меняя периодичность контроля, рассчитываются значения вероятностей.

Зависимость вероятности готовности к работе P от периодичности технического обслуживания t_a показана на рис. 2.

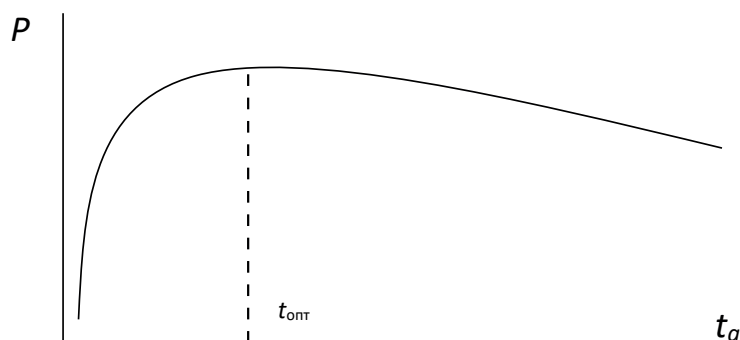


Рис. 2. Зависимость вероятности готовности к работе от периодичности технического обслуживания

При оптимальном значении периодичности технического обслуживания $t_{\text{опт}}$ достигается максимальное значение вероятности готовности к работе. Это значит, что при этой периодичности контроля выявляются все дефекты и обеспечивается надежная работа трубопроводов в межконтрольный период.

Таким образом, применение вероятностных методов помогает рассчитать периодичность технического обслуживания с максимальным значением вероятности готовности к работе трубопровода ГПП. Появления дефектов можно также избежать, придерживаясь проектных решений.

Список источников

1. Степанов В. В., Пришедко В. Ю. Контроль и прогнозирование состояния трубопроводов высокого давления // Обеспечение надежности теплоэнергетического оборудования. Техническое диагностирование и экспертиза промышленной безопасности : материалы III Междунар. Урал. науч.-практ. конф., г. Челябинск, 2–4 дек. 2015 г. Челябинск : Цицеро, 2016. С. 146–150.
2. Математическое описание износа оборудования в процессе работы / И. Р. Рашитов [и др.] // Экспертиза промышл. безопасности и диагностика опас. производств. объектов. 2016. № 1 (7). С. 79–81.
3. Основные работы, необходимые для определения технического состояния технологических трубопроводов / Н. В. Воронин [и др.] // Экспертиза промышл. безопасности и диагностика опас. производств. объектов. 2016. № 1 (7). С. 94–95.

УДК 621.311.22

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО УЗЛА ИЖЕВСКОЙ ТЭЦ-2

**С. С. Черепанов¹, М. М. Килина², В. А. Вавилов³,
И. И. Фахразиев⁴, И. Н. Осипова⁵**

^{1,2,3,4,5} Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

⁴ ilsha-22@mail.ru

Аннотация. Компания «Т Плюс» занимает лидирующие позиции в выработке электрической и тепловой энергии. Однако удельные потери — одни из самых высоких в выборке. По этой причине необходимо сосредоточиться на модернизации оборудования и тепловых сетей. Выбор теплового узла Ижевской теплоэлектроцентрали 2 (ТЭЦ-2) обусловлен наличием программы модернизации генерирующих объектов тепловых электростанций на 2022—2026 гг., утвержденной Правительством РФ, а также такими точками роста, как оптимизация режимов работы станции и сетей, активная жилищная застройка и нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Ключевые слова: тепловой узел, модернизация, Ижевская теплоэлектроцентраль, центральный тепловой пункт, нетрадиционные возобновляемые источники энергии, энергоэффективность

HEATING UNIT MODERNIZATION OF IZHEVSK CHPP-2

**S. S. Cherepanov¹, M. M. Kilina², V. A. Vavilov³,
I. I. Fakhraziev⁴, I. N. Osipova⁵**

^{1,2,3,4,5} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

⁴ ilsha-22@mail.ru

Abstract. The “T Plus” company holds leading positions in the generation of electric and heat energy. However, the specific losses are one of the highest in the sample. Therefore, it is necessary to focus on the modernization of equipment and heating networks. The choice of Izhevsk CHPP-2 heating unit is due to the existence of a program for generating facilities modernization of heat power plants in 2022—2026, approved by the Government of the Russian Federation, plus such growth

points as optimization of the station and network operating modes, active residential development and non-traditional renewable energy sources.

Keywords: heating unit, modernization, Izhevsk combined heat and power plant, central heating station, non-traditional renewable energy sources, energy efficiency

В целях повышения уровня сервиса клиента и эффективности инвестиций необходимо снижать операционные затраты с помощью внедрения системного подхода в модернизации теплового узла от генерации до клиента. Для достижения цели решаются задачи по модернизации основного оборудования станции, тепловых сетей с заменой тепловой изоляции, изучается возможность использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Модернизация теплового узла состоит из нескольких составляющих:

- 1) модернизация основного генерирующего оборудования на станции и возможное использование нетрадиционных источников энергии;
- 2) для старой застройки модернизация всех центральных тепловых пунктов (ЦТП) с применением современного автоматического оборудования: узлов учета, датчиков погодного регулирования, использованием частотных преобразователей. У каждого потребителя свой узел учета. Возможное использование нетрадиционных источников энергии. Модернизация существующих тепловых сетей для уменьшения теплопотерь;
- 3) для новой застройки отказаться от использования ЦТП, использовать современные индивидуальные тепловые пункты (ИТП);
- 4) возможность строительства индивидуальных придомовых котельных.

Эти варианты позволят снизить потери при транспортировке теплоносителя, уменьшить затраты на собственные нужды, повысить эффективность инвестиций, использовать альтернативную энергетику, что является важной перспективой в реалиях развития энергетики.

Был проведен краткий анализ использования нетрадиционных источников энергии в других странах.

В Швеции занимаются утилизацией бытовых отходов. Почти половина отходов в стране сжигается, причем количество выделяемой только тепловой энергии на 2015 г. составило 14,7 ТВт·ч, не включая электрическую энергию [1].

Великобритания является одним из лидеров по использованию энергии ветра, входит в семерку стран, в которых ветроэнергетика вырабатывает более 20 % потребляемой электроэнергии. Мощность

ветроэнергетических станций в стране достигла 24,1 ГВт [2], а выработка составляет более 10 тыс. МВт·ч [3]. В 2020 г. установленная мощность ветроэнергетики Европы составила 220 ГВт [4].

В Китае активно используются малые гидроэлектростанции (ГЭС). Они обеспечивают 30 % энергопотребления в сельских районах [5].

За счет модернизации основного оборудования Ижевской теплоэлектроцентрали 2 (ТЭЦ-2) значительно повысятся технико-экономические показатели работы станции на тепловом потреблении.

За счет модернизации ЦТП и тепловых сетей использования ИТП для новой застройки значительно сократятся расходы на собственные нужды и тепловые потери.

Использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии покрывает часть возрастающей тепловой нагрузки. Использование таких источников энергии даст компании «Т Плюс» статус экологичного поставщика тепловой и электрической энергии.

Впоследствии с наибольшим приростом строительных фондов, значительным увеличением тепловой нагрузки и невозможностью вырабатывать большее количество электрической энергии предлагается использовать блок топливных элементов в тепловой схеме ТЭЦ-2. На рис. 1 представлена схема работы топливного элемента на расплаве карбоната.

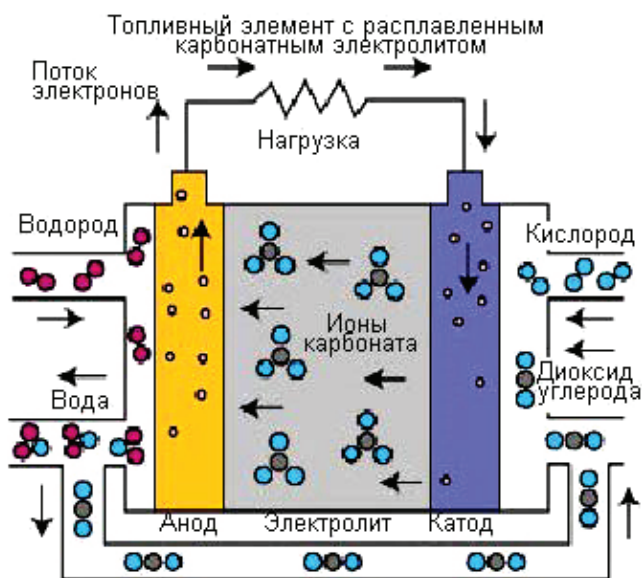


Рис. 1. Топливные элементы на расплаве карбоната

Стационарные теплоэнергетические установки являются альтернативой турбоагрегату, генератору и котлу.

Теплоэнергетическая установка на топливных элементах способна производить высококачественную электроэнергию, используя в качестве топлива природный газ и целый ряд других промышленных газов с высоким содержанием метана без внешней системы риформинга. Процесс переработки углеводородного топлива в водород происходит непосредственно в батареях топливных элементов.

Отработавшие газы теплоэнергетической установки могут быть использованы для создания насыщенного пара посредством направления их на парогенератор от рекуперации тепла, который непосредственно производит пар [6].

В перспективе предусматривается возможность использования экологически чистых возобновляемых источников энергии (например, солнечной энергии или энергии ветра) для разложения воды на водород и кислород методом электролиза, а затем преобразования получившегося топлива в топливном элементе. По экономическим подсчетам срок окупаемости составит 3 года 2 месяца, а с учетом дисконтирования доходов увеличится на полтора года. Весомым плюсом установки блока топливных элементов является то, что можно увеличивать мощность плавно.

При всех мероприятиях соблюдается строгая концепция предоставления качественного теплового ресурса потребителю.

Список источников

1. Нулевые отходы: как в Швеции решают проблему мусора [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/obschestvo/4285030> (дата обращения: 07.12.2020).

2. Энергия ветра в Великобритании — Wind power in the United Kingdom [Электронный ресурс]. URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Wind_power_in_the_United_Kingdom (дата обращения: 02.12.2020).

3. Британия побила рекорд по выработке энергии ветра [Электронный ресурс]. URL: <https://econet.ru/articles/144784-britaniya-pobila-rekord-po-vyработке-energii-vetra> (дата обращения: 02.12.2020).

4. Установленная мощность ветроэнергетики Европы достигла 220 ГВт в 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://renen.ru/ustanovlennaya-moshhnost-vetroenergetiki-evropy-dostigla-220-gvt-v-2020-g/> (дата обращения: 27.02.2021).

5. Мировая гидроэнергетика: настоящее и будущее [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/189/13648> (дата обращения: 04.12.2020).

6. Пример теплоэнергетической установки (2.8 МВт) на топливных элементах (карбонатные топливные элементы) [Электронный ресурс]. URL: https://intech-gmbh.ru/energy_unit_2800kw/ (дата обращения: 09.12.2020).

УДК 62-69

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ РАДИАТОРА ОТОПЛЕНИЯ С НИЗКОПРОФИЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ, ОБЛАДАЮЩЕГО УЛУЧШЕННЫМИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

С. С. Черепанов¹, В. А. Вавилов², И. И. Фахразиев³, Д. А. Хворенков⁴

^{1,2,3,4} Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

¹ stepan.cherepanov.1997@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена конструкция радиатора отопления с низкопрофильным оребрением. За счет использования низкопрофильного оребрения улучшаются теплотехнические характеристики изделия и появляется возможность изготовления теплообменных аппаратов с меньшими конструктивными размерами. Работа подразумевает поэтапное решение проблемы, в настоящее время находится на стадии изучения проблематики и разработки компьютерной модели.

Ключевые слова: радиатор отопления, низкопрофильное оребрение, накатка, интенсификация теплообмена, энергоэффективность

DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION OF THE HEATING RADIATOR WITH A LOW-PROFILE FINISHING WITH IMPROVED THERMAL CHARACTERISTICS

S. S. Cherepanov¹, V. A. Vavilov², I. I. Fakhraziev³, D. A. Khvorenkov⁴

^{1,2,3,4} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

¹ stepan.cherepanov.1997@mail.ru

Abstract. The paper considers the design of a heating radiator with low-profile fins. Due to the use of low-profile ribbing, the thermal technical characteristics of the product are improved, and it becomes possible to manufacture heat exchangers with smaller design dimensions. The work involves a step-by-step solution to the problem, and at this stage is studying the problems and developing a computer model.

Keywords: Heating radiator, low-profile fins, knurling, heat transfer intensification, energy efficiency

Теплообменные аппараты занимают одну из ключевых позиций в промышленной теплоэнергетике [1]. Одной из главных задач теплообменников является теплообмен между средами, например газообразными и жидкими веществами. При этом эффективность ограничивается коэффициентами теплопроводности загрязнений и ламинарного слоя среды на поверхности металла, сопротивлением теплоотдачи со стороны газа. Это связано с низким коэффициентом теплоотдачи со стороны газообразной среды, например воздуха, и в то же время высоким — со стороны жидкости. В связи с этим становится актуальным повышение эффективности работы теплообменных аппаратов за счет усовершенствования их конструкции.

Сегодня стремительно развиваются современные технологии как по соединению, так и обработке самых различных материалов. Это дает возможность разрабатывать компактные, с высокой энергоэффективностью и надежностью, конструкции теплообменных аппаратов. Наибольшее распространение получили спирально-оребрённые конструкции — теплообменники с увеличенной поверхностью [2]. Такой способ изготовления характеризуется особой технологией разработки, широким выбором геометрии, компактной структурой, интенсивным теплообменом и улучшенными экономическими показателями. На практике использование таких теплообменных аппаратов в устройствах различного типа подтвердило их надежность и увеличение показателя интенсивности теплопередачи на 40–60 % по сравнению с трубами, имеющими гладкие поверхности [3].

Конвективно-радиационный отопительный прибор состоит из отдельных элементов — секций с внутренними каналами, внутри которых циркулирует теплоноситель. Тепло от радиатора отводится излучением, конвекцией и теплопроводностью. Служит для поддержания комфортной температуры в помещении [4]. Он имеет улучшенные теплотехнические характеристики за счет оребрения конвективных поверхностей. Использование низкопрофильного оребрения может позволить увеличить интенсивность теплообмена и при этом сократить поверхность теплообмена таких радиаторов. Нанесение оребрения с помощью накатки позволяет не только снизить затраты на оребрение, но и уменьшить напряжение в основании ребра, тем самым повысив надежность аппарата.

Такое техническое решение даст возможность снизить температуру теплоносителя в обратном трубопроводе или уменьшить габариты теплоустановки, а также поддержать температуру в помещении в нормируемых пределах.

Теплоотдача радиатора отопления прямо пропорциональна температурному напору, коэффициенту теплопроводности, площади пластин радиатора. Такая зависимость представлена формулой [5]:

$$Q = dTkS,$$

где dT — температурный напор, °C; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м² · К); S — площадь поверхности радиатора отопления, м².

Увеличение площади за счет оребрения позволит снизить габаритные размеры теплообменной установки и при этом сохранить мощность, что существенно скажется на окончательной стоимости теплообменника. Как видно из рис. 1, на наружной поверхности ребристой части расположены ребра, а профиль ребра имеет треугольную форму. Отношение ширины ребра к ширине дна канавки ребра составляет 1/4—1/6, что увеличивает площадь теплообменной поверхности пластины.

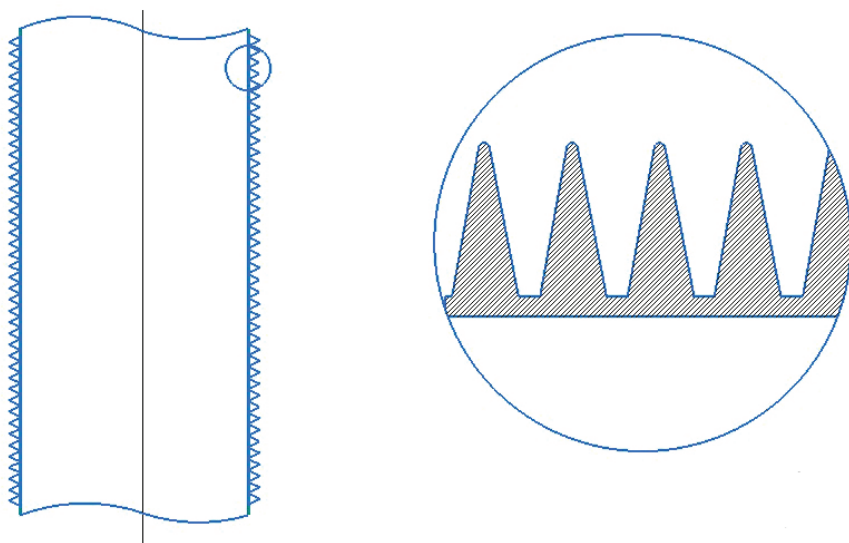


Рис. 1. Теплообменная трубка, оребренная с помощью накатки

Отопительный прибор должен быть прочным, герметичным и выдерживать пробное давление воды или воздуха, превышающее не менее

чем в 1,5 раза максимальное рабочее давление, но не менее 0,6 МПа. Отклонения значения номинального теплового потока отопительного прибора от заявленного изготовителем должны быть в пределах от -4% до $+5\%$. Радиатор отопления должен иметь термостойкое защитно-декоративное покрытие, обеспечивающее его защиту от коррозии. Качество покрытия поверхностей, видимых при эксплуатации отопительных приборов, должно быть не ниже класса IV по ГОСТ 9.032. Предлагаемый отопительный прибор будет работать по графику 105/70 и 95/70.

В ходе выполнения работы рассматривается вопрос внесения изменений в конструкцию радиатора отопления. Предлагается выполнить теплообменные поверхности в виде оребрения с помощью технологии накатки. Результатом станет уменьшение габаритных размеров радиатора, а использование технологии накатки существенным образом сыграет роль в снижении себестоимости продукции.

Список источников

1. Тимохин И. В. Повышение эффективности теплообменных аппаратов на основе модификации теплообменных поверхностей (оребрение) с использованием ПАВ // Студен. форум. 2018. № 28 (49). С. 37–39.
2. Афанасьева И. В. Перспективные методы оребрения теплообменных аппаратов // Современ. наукоем. технологии. 2019. № 7. С. 114–121. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37599> (дата обращения: 07.11.2020).
3. Лобанов И. Е., Штейн Л. М. Теория интенсифицированного теплообмена и эффективности его применения для перспективных компактных теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве // Альм. современ. науки и образования. 2010. № 3 (34). С. 24–42.
4. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.
5. Радченко С. А., Сергеев А. Н. Теплотехника и энергетические машины. Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. 630 с.

УДК 624.9

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКА

О. А. Чехранова¹, Е. Г. Гашо²

^{1,2} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

¹ Chehranova.olga@yandex.ru

Аннотация. В статье приведен анализ текущей ситуации теплоэнергетического комплекса Красноярска. Разработаны мероприятия по совершенствованию источников теплоснабжения, определению перспективных источников и расчету их теоретического и практического теплового потенциала с учетом экономической целесообразности.

Ключевые слова: низкопотенциальное тепло, энергоэффективность, экологическая безопасность, теплонасосная установка, вторичные энергоресурсы

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HEAT SUPPLY SCHEMES FOR EFFICIENT USE OF ENERGY RESOURCES ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KRASNOYARSK

O. A. Chekhranova¹, E. G. Gasho²

^{1,2} National Research University

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

¹ Chehranova.olga@yandex.ru

Abstract. This article analyzes the current situation of the heat and power complex of the city of Krasnoyarsk. Measures have been developed to improve heat supply sources, identify promising sources, and calculate their theoretical and practical heat potential, taking into account economic feasibility.

Keywords: low-potential heat, energy efficiency, environmental safety, heat pump installation, secondary energy resources

Для полноценного развития страны необходимо обеспечивать урбанизацию городов, которая характеризуется расширением и улучшением социальной сферы, строительных, наукоемких и промышленных отраслей, а также стратегически важным является развитие энергетики как регионов в частности, так и страны в целом.

В энергетической стратегии России на период до 2035 г. указано, что приоритеты государственной энергетической политики — это развитие энергетического сектора, которое будет обеспечиваться с учетом следующих приоритетных направлений государственной энергетической политики [1]:

1) гарантированное обеспечение энергетической безопасности страны и ее регионов, включая недопущение в любых условиях дефицита топливно-энергетических ресурсов;

2) создание стратегических запасов топлива, необходимых резервных мощностей и комплектующего оборудования;

3) обеспечение стабильности функционирования систем электроэнергетического комплекса и теплоснабжения;

4) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике;

5) рациональное природопользование и энергетическая эффективность;

6) максимальное использование преимуществ централизованных систем энергоснабжения.

За все время существования теплоснабжения в России система стала самой масштабной в мире, порядка 40 % от мировой доли приходится на российское централизованное производство тепла, которое состоит из 55 тыс. локальных и 20 тыс. обслуживаемых систем и предприятий. За 2018 г. потребление тепловой энергии составило порядка 800 млн Гкал, из них 5 % приходится на горячее водоснабжение, 45 % — на отопление, половину составляет промышленность [2].

Проведен анализ теплоснабжения Красноярска, выявлены ключевые особенности, проблемы и тепловой потенциал города. Красноярск — крупный промышленный город, имеющий большой потенциал для совершенствования теплоснабжения, внедрения энергоэффективных технологий и ввода низкопотенциальных источников с практически нулевыми выбросами. Такими источниками, по нашему мнению, являются крупная река Енисей, которая не замерзает круглый год, сбросное тепло от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и тепловые по-

тери от крупного промышленного предприятия — Красноярского алюминиевого завода (КраЗ).

В Красноярске функционирует множество промышленных предприятий, которые, в свою очередь, на своем производстве теряют до 60 % тепловой энергии, наиболее крупным является КраЗ. Несмотря на то что теплоснабжение города осуществляется преимущественно от ТЭЦ, в городе присутствует большое количество котельных.

Общая площадь жилого фонда составляет 26 тыс. м². Оценивая это показатель в м² на человека, получаем, что в среднем на одного жителя Красноярска приходится 20 м², что соответствует норме.

Экологическая обстановка Красноярска крайне тяжелая, ежемесячно фиксируются превышения предельно-допустимой концентрации (ПДК) атмосферного воздуха порядка на 20 %.

Основными источниками выбросов являются предприятия промышленного комплекса, теплоэнергетические предприятия и автотранспорт.

Основными источниками низкопотенциального тепла является незамерзающая река Енисей. Теоретический потенциал Енисея составляет 60–100 млн Гкал. Крупными источниками сбросного тепла являются Красноярские ТЭЦ. Ежегодно на ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 сбрасывается порядка 4 млн Гкал, а на ТЭЦ-3 — около 1 млн Гкал. Ежегодное потребление КраХ составляет 13 млн Гкал, из них 8 млн Гкал сбрасывается в атмосферу.

Таким образом, тепловые электростанции имеют большой запас низкопотенциального тепла в системе водооборотного охлаждения. Сегодня технически возможно утилизировать до 50 % низкопотенциального тепла, что составляет порядка 10 % от количества отпускаемой теплоты. Для утилизации применяют теплонаносные установки (ТНУ).

В настоящей работе рассмотрено два варианта использования низкопотенциального тепла: 1) использование ТНУ для дополнительного производства электрической энергии; 2) увеличение отпуска теплоты от ТЭЦ. В качестве низкопотенциального источника была выбрана охлаждающая вода технического водоснабжения. Выбор такого источника низкопотенциального тепла даст следующие преимущества:

- 1) сокращение сбросного тепла;
- 2) снижение температуры воды на входе в паровую турбину (ТП);
- 3) повышение экологической эффективности.

Температурный уровень подпиточной воды на Красноярских ТЭЦ в среднем составляет 35 °С, перед деаэратором и расход пропиточной воды составляет усредненно 2200 т/ч, что позволяет установить ТНУ большого диапазона мощности — от 1 до 100 МВт. Следовательно, учитывая сказанное, предполагается место включения ТНУ в тепловую схему ТЭЦ после пучков конденсаторов турбин.

Результаты расчета экономии топлива относительно названных выше вариантов показали, что наибольшую экономию даст второй. Также внедрение ТНУ дает значительное сокращение УРУТ на станциях. При этом при внедрении ТНУ увеличиваются затраты на собственные нужды на электроэнергию. От тарифа на электроэнергию зависит срок окупаемости такого мероприятия, в среднем он составляет от 3 до 6 лет.

Самым мощным источником энергии является Енисей, и в условиях города наиболее эффективным источником могут стать теплонаносные установки, использующие теплоту речной воды. Тепловые насосы большой мощности распространены в Швеции и Финляндии. В настоящее время производство отечественных парокомпрессионных тепловых насосов большой мощности осуществляется в Новосибирске, тепловая мощность достигает 3 МВт. Производство с центробежными компрессорами организовано в Казани, тепловая мощность — порядка 11,5 МВт. Экологическая эффективность теплового насоса уже доказана [3]; применяемый в расчете фреон не влияет на озоновый слой, но воздействует на парниковый эффект с GWP = 1340 по сравнению с CO₂.

Еще одним крупным источником энергии является КрАЗ. Завод ежегодно производит более 1 млн т алюминия, производство которого высокоэнергоемкое. Основным источником энергии является Красноярская ГЭС. Потребление энергии на производство 1 т алюминия составляет примерно 13,5 млн Гкал. Для минимизации потери тепла и дальнейшего его использования предлагается в процессе электролиза устанавливать воздушные теплообменные аппараты. Энергетическим и экологическим эффектом от таких мероприятий после совершенствования процессов стало сокращение выбросов более чем в 1,5 раза; они составляют уже не 60, а 40 %.

Для повышения эффективности теплоснабжения необходимо модернизировать оборудование и использовать более эффективные методы получения энергии, например получение тепла от низко-потен-

циальных источников. По классификации, представленной в работе Е. Г. Гашо [4], Красноярск относится к 3-й категории по удельному показателю энергопотребления; выше средних показателей в 12 (т у. т.)/чел. По параметрам модели выделения приоритетов в энергоэффективном развитии региональных ТС Красноярск должен руководствоваться тем, что перспективный объем V_i потребления ресурсов должен быть ниже текущего V . В приоритете группы должна быть комплексная модернизация всех энергоемких производств, применение всех имеющихся ресурсов и использование энергоресурсов более высокого качества.

Список источников

1. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс] : распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 25.03.2020).
2. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/d81b29821e3d3f5a8929c84d808de81d/energyefficiency2019.pdf> (дата обращения: 01.04.2020).
3. Султангузин И. А., Потапова А. А. Высокотемпературные тепловые насосы большой мощности для теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2010. № 10. С. 23–27.
4. Гашо Е. Г. Разработка методологии совершенствования промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем [Электронный ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / Евгений Геннадьевич Гашо. М., 2018. 449 с. URL: <https://mpei.ru/diss/Lists/FilesDissertations/364-Диссертация.pdf> (дата обращения: 01.04.2020).

УДК 669.184.152.6

ОБЪЕМНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ

А. А. Чечушкин¹, С. В. Картавцев²

^{1,2} Магнитогорский государственный технический университет
имени Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

¹ tolik_chechushkin@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен вариант использования конвертерного газа в качестве вторичного энергоресурса, проанализирован способ утилизации химического и физического тепла конвертерного газа путем образования смеси с природным газом.

Ключевые слова: вторичные энергоресурсы, энергоэффективность, конвертерный газ, энергопотребление, топливо

VOLUMETRIC COOLING OF CONVERTER GASES

A. A. Chechushkin¹, S. V. Kartavtsev²

^{1,2} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ tolik_chechushkin@mail.ru

Abstract. The paper considers the option of using converter gas as a secondary energy resource, analyzes the method of utilization of chemical and physical heat of converter gas by forming a mixture with natural gas.

Keywords: secondary energy resources, energy efficiency, Converter gas, energy consumption, fuel

Наиболее значимым резервом экономии топлива в современной промышленности является использование вторичных энергоресурсов. В настоящее время металлургия является одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности. Одним из способов энергосбережения служит использование теплоты отходящих газов.

Конвертерный газ представляет собой ценный энергетический ресурс большой мощности и объема. Перспективным решением экономии топливно-энергетических ресурсов является применение кон-

вертерного газа в качестве топлива [1; 2]. В современных условиях большинство предприятий металлургии не используют конвертерный газ как топливо. Этому способствуют такие факторы, как высокая температура газа, низкая по сравнению с природным газом теплота сгорания. Для охлаждения газа и повышения теплоты сгорания необходимо в конвертерный газ добавить углерод. Для увеличения скорости реакции нужно достичь предела измельчения — атома. В молекуле природного газа один атом углерода. При взаимодействии двуокиси углерода с молекулой природного газа образуется две молекулы СО и две молекулы водорода. При этом CO_2 переводится в СО, образуется смесь, состоящая преимущественно из СО с небольшим содержанием водорода, что ведет к образованию высококалорийного газа. В таблице приведены характеристики конвертерного газа до и после смешивания с природным газом [3].

Таблица

Характеристика конвертерного газа до и после смешивания
с природным газом

Характеристика	Значения	
	До взаимодействия	После взаимодействия
Температура, °С	1400–1800	800
Теплота сгорания, МДж/кг	10,5	12,6

Таким образом применение природного газа для объемного охлаждения конвертерных газов является перспективным направлением.

Список источников

1. Картавцев С. В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА. Магнитогорск : МГТУ, 2000. 188 с.
2. Чечушкин А. А., Ситкина Д. А., Картавцев С. В. Актуальность использования конвертерных газов на металлургическом комбинате // Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящен. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 дек. 2019 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2019. С. 527–529.
3. Способ утилизации тепла конвертерного газа : а. с. 956570 СССР: МКИ С 21С5/38/Н. И. Иванов [и др.]. № 3241941/22-02 ; заявл. 03.02.81; опубл. 07.09.82, Бюл. № 12.

УДК 696.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ДЕЗИНФЕКЦИИ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАРАЖЕНИЯ

О. С. Чупракова¹, Е. А. Бирюзова²

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ ok.chuprakova@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены общие требования к качеству воды в системе горячего водоснабжения в отношении бактериальной микрофлоры. Разработаны мероприятия по устранению бактерий *Legionella pneumophila* в системах горячего водоснабжения лечебных учреждений Москвы, а также их научное обоснование.

Ключевые слова: *Legionella pneumophila*, дезинфекция, системы горячего водоснабжения

INVESTIGATION OF METHODS OF DISINFECTION OF HOT WATER IN THE HOT WATER SUPPLY SYSTEM FROM MICROBIOLOGICAL CONTAMINATION

O. S. Chuprakova¹, E. A. Biryuzova²

^{1,2} Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

¹ ok.chuprakova@yandex.ru

Abstract. The paper presents the general requirements for the quality of water in the hot water supply system in relation to bacterial microflora. Measures have been developed to eliminate *Legionella pneumophila* bacteria in the hot water supply systems of medical institutions in Moscow. As well as their scientific justification.

Keywords: *Legionella pneumophila*, disinfection, hot water supply systems

Система горячего водоснабжения обеспечивает горячей водой хозяйственные и технологические нужды здания. Такой водой снабжаются жилые здания с проживанием людей, профилактические учреждения (поликлиники, госпитали, больницы), здания санитарно-гигиенического и коммунального обслуживания, учебные и детские дошкольные учреждения, здания торговли и общественного питания, культурно-просветительные учреждения, а также промышленные здания и сооружения.

Легионеллез (болезнь легионеров) — это заболевание, проявляющееся поражением органов дыхания с развитием тяжелой формы пневмонии. Первая массовая вспышка заболевания произошла в 1976 г. среди участников съезда Американского легиона — с этим и связано ее название. Тогда же впервые была обнаружена бактерия-возбудитель *Legionella pneumophila*. Основной фактор передачи возбудителя — наличие мелкодисперсных аэрозолей, воздушно-капельный путь передачи, возможен аэрозольный путь для лиц с низким иммунитетом [1; 2]. Учитывая тяжесть течения болезни легионеров, высокую смертность, наличие в Москве большого количества потенциально опасных водных систем, а также людей с высоким риском заболевания, разработка методов по предупреждению заражения водных систем является особо значимой.

В России уделяется большое внимание эпидемиологической, химической и микробиологической безопасности систем горячего водоснабжения. Документы, действующие в рамках государственного санитарно-эпидемиологического нормирования, призваны обеспечивать безопасную для потребителей эксплуатацию систем горячего водоснабжения [3; 4].

Бактерия *Legionella pneumophila* была включена в санитарно-эпидемиологические нормативные документы как микробиологический фактор риска. До этого она отсутствовала в перечне микробиологических факторов риска в более ранних версиях документов по санитарной безопасности горячего водоснабжения. Включению в санитарные нормы поспособствовали результаты расследования эпидемической вспышки легионеллеза в Верхней Пышме в 2007 г., практический опыт США и стран Западной Европы, которые свидетельствовали о высоком уровне концентрации легионелл в системе горячего водоснабжения в качестве причины возникновения эпидемии, а также данные о системе горячего водоснабжения (ГВС) как источнике распростра-

нения бактерий легионелл. По данным Европейской рабочей группы по легионеллезу (EWGLI), в 2002–2007 гг. в странах Европы зарегистрировано 215 вспышек и групповых случаев легионеллеза, связанных с превышением допустимой концентрации легионелл в системе горячего водоснабжения.

Отметим целесообразность разработки эффективного комплекса мер для обеспечения микробиологической безопасности эксплуатации систем ГВС в России с учетом зарубежного опыта и собственных разработок. В результате выполнения исследования составлена сравнительная таблица методов дезинфекции воды.

Таблица

Сравнение различных методов дезинфекции, используемых для профилактики легионеллеза в системах водоснабжения

Метод	Достоинства	Недостатки
Фильтры конечной фильтрации	Физический барьер Легкая установка с помощью адаптеров Применение для систем ГВС и ХВС Оптимален в отделениях групп риска ЛПУ	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется регулярная замена фильтра • Твердые частицы в воде снижают скорость течения воды и срок эксплуатации • Высокая стоимость
Поддержание температуры ниже 55 °С	Просто, эффективно и легкий контроль	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Legionella</i> не погибает • Постоянное поддержание такой температуры • В водных системах затруднено • Требуется защита от ожогов
Периодическое промывание горячей водой температурой более 70 °С	Просто, эффективно и легкий контроль	<ul style="list-style-type: none"> • Не применяется для систем ХВС • Требуется защита от ожогов • Для достижения и поддержания заданных параметров требуется постоянная проверка и надзор • Возможно повторное заражения легионеллами
Обработка гипохлоритом натрия	Простота и эффективность Относительно низкие затраты	<ul style="list-style-type: none"> • Образование побочных продуктов дезинфекции • Влияет на вкус и запах воды • Вещество не устойчиво, особенно в горячей воде • Повышает коррозию

Окончание табл.

Метод	Достоинства	Недостатки
Обработка ди- оксидом хлора	Простота и эффектив- ность	<ul style="list-style-type: none"> • Образование хлорита • Для пациентов на гемодиализе требуется защита, в том числе угольный фильтр • Требуется соблюдение техники безопасности
Обработка пере- кисью водорода	Простота в применении	<ul style="list-style-type: none"> • Слабый дезинфектант • Способен вызывать мутации

Для закрытых систем ГВС рекомендуется температура воды не ниже 60 °С при выполнении ряда профилактических мероприятий:

1) обязательного периодического (не реже 1 раза в квартал) краткосрочного (не менее 24 часов) профилактического повышения температуры воды в системе до отметки не менее 70 °С;

2) регулярных лабораторных бактериологических исследованиях горячей воды на легионеллы с центральных тепловых пунктов в рамках производственного контроля (помимо основных санитарно-показательных микроорганизмов).

Список источников

1. Легионеллез: эпидемиология, клиника, терапия и профилактика / И. Б. Гучев [и др.] // Санитар. врач. 2009. № 9. С. 11–21.

2. Болезнь легионеров как проблема биологической безопасности / И. С. Тартаковский [и др.] // Теорет. и практ. аспекты соврем. Эпидемиологии : материалы науч.-практ. конф, посвящ. 75-й годовщине со дня рождения акад. РАМН Б.Л. Черкасского, Москва, 28 янв. 2009 г. М. : Санэпидмедия, 2009. С. 95–98.

3. СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения [Электронный ресурс]. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901798042> (дата обращения: 10.12.2020).

4. СанПиН 2.1.4.2496–09. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Изм. к СанПиН 2.1.4.1074–01 [Электронный ресурс]. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902156582> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 697.1

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ПОЛИКЛИНИКИ

Е. В. Шадчинева¹, Н. П. Ширяева²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ lena.shadchineva@mail.ru

Аннотация. В работе представлен расчет показателей надежности системы отопления поликлиники. Определены гидравлическая и тепловая характеристики системы отопления. Произведена оценка теплового разрегулирования в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, гидравлическая характеристика, тепловая характеристика, надежность, разрегулирование

CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS FOR THE POLYCLINIC HEATING SYSTEM

E. V. Shadchineva¹, N. P. Shiryaeva²

^{1,2} Ural Federal University named after the First President
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ lena.shadchineva@mail.ru

Abstract. The paper presents the calculation of reliability indicators of the polyclinic heating system. The hydraulic and thermal characteristics of the heating system are determined. The estimation of thermal misalignment in operational conditions is made.

Keywords: energy efficiency, hydraulic characteristics, thermal characteristics, reliability, misalignment

Надежность (безотказность) является одним из важных показателей, определяющих потребительские свойства системы отопления. Надежность системы отопления — это ее способность под-

держивать в помещении требуемую температуру внутреннего воздуха, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение определенного временного периода. Обеспечение надежности и минимизация расходов тепловой энергии на отопление связаны с применением рациональных схем и технических решений [1].

Одним из видов нарушения надежности системы отопления является ее разрегулирование, связанное с отличием условий ее эксплуатации в течение отопительного периода от расчетных [2]. Отличие может заключаться также в нарушении структуры системы или в изменении параметров теплоносителя. При центральном качественном регулировании системы ее разрегулирование происходит вследствие несоответствия изменения теплопередачи отопительных приборов изменению теплопотребности обогреваемых помещений при переменных метеорологических факторах (температура наружного воздуха, скорость ветра), которые должны учитываться при центральном качественном регулировании [3].

Степень разрегулирования системы отопления при центральном качественном регулировании можно определить с помощью безразмерных величин: гидравлической характеристики Γ и тепловой характеристики T .

Расчет показателей надежности произведен для системы отопления поликлиники, расположенной по адресу: Свердловская область, г. Асбест, ул. Ленинградская, д. 22.

Система отопления — вертикальная двухтрубная, отопительные приборы — стальные панельные радиаторы фирмы PRADO марки Classic Z высотой 300 мм. Располагаемое давление в системе отопления составляет 25 кПа, температурный график 85/70. Расчетная температура внутреннего воздуха 20 °С. Распределительный коллектор находится в подвале на отметке минус 1,5 м, за нулевую отметку принят уровень чистого пола первого этажа. Отопительный прибор расположен на высоте 200 мм от пола, высота этажа составляет 3,0 м, толщина перекрытия 300 мм.

Гидравлическая характеристика системы выражает долю естественного циркуляционного давления в общем циркуляционном давлении системы в расчетных условиях или существующее в расчетных условиях отношение естественного циркуляционного давления к сумме естественного циркуляционного давления и насосного давления на вводе [3].

$$\Gamma = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_n + \Delta P_e}, \quad (1)$$

где ΔP_e — естественное циркуляционное давление при расчетной температуре подаваемой и обратной воды; ΔP_n — насосное циркуляционное давление; ΔP_p — располагаемое давление в системе.

Расчет выполнен для верхнего прибора самого удаленного от узла ввода стояка (рис.).

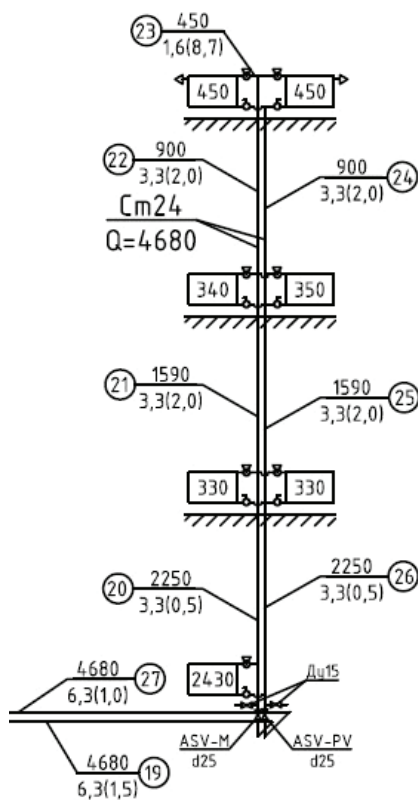


Схема расчетного стояка

Величина ΔP_e вычисляется по формуле

$$\Delta P_e = hg(\rho_o - \rho_r),$$

где h — расстояние между центрами охлаждения и нагрева воды; ρ_r и ρ_o — плотность подаваемой и обратной воды соответственно; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Естественное циркуляционное давление в кольце через верхний прибор составило 5 Па, тогда гидравлическая характеристика Γ равна

$$\Gamma = \frac{5}{25000} = 0,0002.$$

Значение гидравлической характеристики в системах отопления может изменяться от 0 до 1. Значение $\Gamma = 0,0002$ соответствует системе с большим давлением, создаваемым насосом, и очень малым естественным циркуляционным давлением.

Тепловая характеристика T определяется по формуле [2]:

$$T = \frac{\Delta t_{\text{ср}} \Delta t_{\text{ср. отн}}^n}{t_{\text{г}} - t_{\text{о}}} = \frac{n}{64,5^n \cdot \left[(t_{\text{о}} - t_{\text{в}})^{-n} - (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})^{-n} \right]},$$

где $\Delta t_{\text{ср}}$ — средний температурный напор приборов по высоте системы; $\Delta t_{\text{ср. отн}}^n$ — средний относительный температурный напор приборов; n — показатель степени, характеризующей зависимость теплопередачи приборов от температуры напора, принятый равным 0,3 [4]. При расчетных условиях тепловая характеристика равна

$$T = \frac{0,3}{64,5^n \cdot \left[(70 - 20)^{-0,3} - (85 - 20)^{-0,3} \right]} = 3,67.$$

Пусть при эксплуатационных условиях $t_{\text{г}}$ снизится до 60 °С, а $t_{\text{о}}$ — до 50 °С, тогда тепловая характеристика составит

$$T = \frac{0,3}{64,5^n \cdot \left[(50 - 20)^{-0,3} - (60 - 20)^{-0,3} \right]} = 2,88.$$

Подача тепла производится по графику центрального качественного регулирования. Тепловое разрегулирование в эксплуатационном режиме оценивается по определенной методике [2]. При расчетных условиях отношение тепловых потоков верхнего и нижнего приборов $q_{\text{к}}/q_{\text{н}} = 0,72$, при эксплуатационных условиях $q_{\text{к}}/q_{\text{н}} = 0,68$. Теплопередача приборов верхнего этажа уменьшится примерно на 6 % относительно приборов нижнего этажа.

Список источников

1. Шилькрот Е. О. Эффективность систем отопления и вентиляции зданий // АВОК. 2020. № 7. С. 65–68.

2. Отопление и вентиляция. Ч. 1. Отопление / П. Н. Каменев [и др.]. М. : Стройиздат, 1975. 483 с.

3. Надежность систем центрального водяного отопления в зданиях повышенной этажности / В. Е. Константинова. М. : Стройиздат, 1976. 183 с.

4. Внутренние санитарно-технические устройства В 3 ч. Ч. 1. Отопление / В. Н. Богословский [и др.] ; под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. М. : Стройиздат, 1990. 344 с.

УДК 519.863

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**С. В. Шаповалов¹, В. Г. Лисиенко², Р. П. Ижевский³, Ю. Н. Чесноков⁴,
С. И. Холод⁵, В. В. Рогачев⁶**

^{1, 2, 4, 5, 6} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ Артемовский машиностроительный завод «Вентпром», Артемовский, Россия

⁵ Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Россия

¹ hsi503@yandex.ru

Аннотация. В работе получены статистические показатели, характеризующие оптимальные значения параметров процесса плавки концентрата в печах Ванюкова. Представлены рекомендации для анализа технологического процесса.

Ключевые слова: стохастические параметры, имитационное моделирование, печь Ванюкова, оптимальные характеристики, метод Монте-Карло

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF METALLURGICAL PROCESSES BY THE METHOD OF SIMULATION

**S. V. Shapovalov¹, V. G. Lisienko², R. P. Izhevsky³, Yu. N. Chesnokov⁴,
S. I. Holod⁵, V. V. Rogachev⁶**

^{1, 2, 4, 5, 6} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ AMZ “Ventprom”, Artyomovsky, Russia

⁵ UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia

¹ hsi503@yandex.ru

Abstract. In this work, statistical indicators are obtained that characterize the optimal values of the parameters of the concentrate smelting process in the Van-yukov furnaces. Recommendations for the analysis of the technological process are presented.

Keywords: stochastic parameters, simulation, Vanyukov furnace, optimal characteristics, Monte Carlo method

Сложные и динамично развивающиеся технологические отрасли производства предъявляют повышенные требования к рациональному использованию ресурсов в условиях неопределенности. Металлургические предприятия служат ярким примером неопределенности, связанной со стохастичностью параметров технологического процесса. Для эффективного анализа и управления технологическими процессами целесообразно применять имитационное моделирование методом Монте-Карло [1; 2].

Показателем максимальной эффективности и высокого технического уровня производства является критерий качества (оптимальности) Y , который с математической точки зрения является функцией отклика на набор входных переменных X_n :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

В качестве уравнения может быть использована любая функциональная зависимость (линейная, логарифмическая, экспоненциальная и др.), полученная различными способами, например в результате активного (или пассивного) эксперимента.

Для оценки выходной переменной Y вводится пороговое значение $Y_{кр}$, т. к. переменная является критерием качества, который разделяет значения выходной переменной на удовлетворяющие заданным требованиям и не удовлетворяющие им.

В условиях неопределенности, характеризующейся стохастичностью процесса, Y можно считать случайной величиной. По этой причине для нахождения оптимальных и устойчивых характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой полученных данных. При этом функцию отклика можно представлять в процентном выражении, удовлетворяющем критерию качества $Y_{кр}$.

Классические численные методы позволяют приближенно решать подобные задачи путем разбиения пространства на строго определенные участки и заменой действий интегрирования суммированием, дифференцирования методом конечных разностей.

Для поиска оптимальных параметров технологического процесса успешно применяется имитационное моделирование методом Монте-Карло, который позволяет проводить вычислительные операции

с математическими моделями, имитирующими поведение реальных объектов, процессов и систем во времени в течение заданного периода, получить ряд значений функции отклика, реализовать ее распределение. Суть метода достаточно подробно раскрыта в литературе и связана с правилом 3σ , определяющим метод расчета и оценку его погрешности.

Одним из условий применения метода является то, что отклонения случайных величин подчинены нормальному закону распределения с математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равными значениям нормативных показателей, используемых в производстве, экономике т. п.

В настоящей работе получены статистические показатели, характеризующие оптимальные значения параметров процесса плавки концентрата в печах Ванюкова с помощью метода Монте-Карло в прикладном пакете MS Excel.

В качестве функции отклика выбрали ожидаемое процентное содержание меди в штейне. Из технологических показателей процесса плавки на штейн взяли процентное содержание влажности в шихте (X_1), процентное содержание меди в шихте (X_2) и процентное содержание кислорода в дутье (X_3), оказывающее наибольшее влияние на содержание меди в штейне.

Из теории и практики плавки в печах Ванюкова известно, что содержание меди в штейне изменяется от 45 % до 60 %. По этой причине за критерий качества, для которого рассчитывается количество сценариев, приняли значение $Y_{кр} \geq 45 \%$.

В качестве функциональной зависимости выбрали неполное уравнение линейной регрессии, рассчитанное ранее на основе выборки из массива данных металлургического предприятия:

$$Y = 31,86 + 2,67X_1 + 0,34X_2 - 0,13X_3.$$

Стохастичность параметров характеризуются некоторыми диапазонами, в которых находятся все их значения. Так, влажность шихты изменяется в пределах 1–8 %, содержание меди в шихте — 15–19 % по массе, содержание кислорода в дутье — 40–65 об. %. С помощью метода Монте-Карло генерируется большое количество сценариев входных параметров в указанных диапазонах для оценки оптимального процентного содержания меди в штейне.

Для формирования случайных чисел массивов можно использовать одну из функций *СЛУЧМЕЖДУ* или *Генерация случайных чисел*.

В рассматриваемой методике сформировали в виде табл. 1 три массива псевдослучайных чисел из 100 сценариев для каждого показателя с использованием функции *СЛУЧМЕЖДУ*.

В каждой полученной строке таблицы находятся случайные значения влажности шихты, содержания меди в шихте и содержания кислорода в дутье. На основе полученных данных, по каждой строке рассчитывается содержание меди в штейне, массив значений которых тоже является случайной величиной.

Таблица 1

Фрагмент моделирования сценариев
технологического процесса

№ п/п	Фактор	Влажность шихты	Содержание Cu в шихте	Содержание O ₂ в дутье	Содержание Cu в штейне
	min	1	15	40,0	—
	max	8	19	65,0	—
1	—	4	19	0,8	48,896
2	—	8	15	1,2	58,164
3	—	8	16	1,3	58,491
4	—	3	16	0,5	45,245
5	—	7	16	1,1	55,847
...
100	—	1	16	0,2	39,944

Для быстрого визуального анализа рассчитанных значений применяется гистограмма, которая является доступным, легким для восприятия и мощным аналитическим методом графического представления массива данных.

Гистограмма позволяет оценить статистические показатели случайной величины, функцию ее распределения, выявить закономерности, которые сложно обнаружить с помощью расчетов и трудно описать количественно.

Для определения количества интервалов и их оптимальной длины применяется формула Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 n = 1 + 3,322 \lg n ,$$

где k — количества интервалов; n — число наблюдений.

Все показатели расчета на гистограмме выводятся в виде текущих значений массивов данных. При изменении массива псевдослучай-

ных чисел технологических показателей меняется и вид гистограммы (распределение случайной величины по интервалам).

В рассматриваемой задаче для формирования гистограммы выбрали требуемые своим потребностям 6 интервалов шириной 5 % (рис. 1). Как видно из рисунка, в первый интервал попадают значения, меньшие или равные 40 % по содержанию меди в штейне. Во второй — больше 40 %, но меньше или равные 45 % и т. д. Вся площадь гистограммы принимается равной единице, или 100 %.

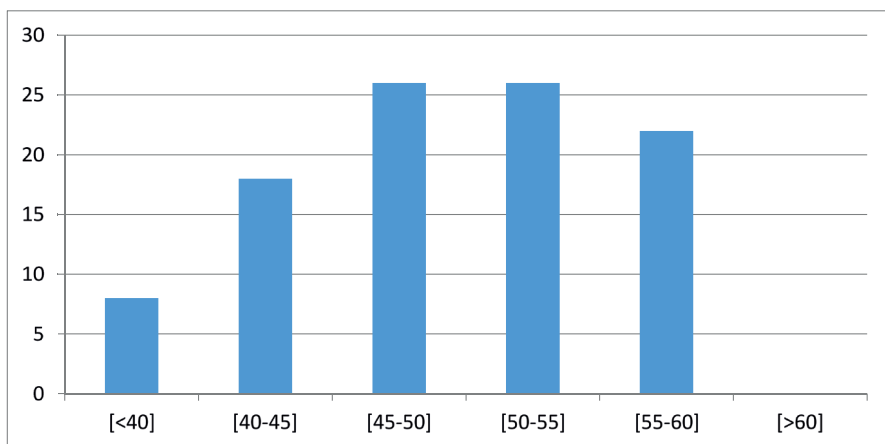


Рис. 1. Гистограмма распределения значений содержания меди в штейне

По виду гистограммы сделаем промежуточную оценку и выводы результатов моделирования. Так, в 8 % сценариев (интервал менее 40 %) процесс плавки вести нецелесообразно. В интервале 40–45 % (18 % сценариев) комбинации исходных данных недостаточно сбалансированы, поэтому для выполнения требований по эффективности процесса получения штейна в печах Ванюкова целесообразно анализировать показатели процесса и использовать известные приемы, улучшающие качество плавки на штейн.

В интервалах от 45 до 60 % сосредоточены оптимальные комбинации исходных данных, обеспечивающие выполнение требований по эффективности технологического процесса. В области, близкой к середине диапазона изменения, природа моделируемого процесса устойчива и содержит наиболее благоприятные сценарии ведения процесса плавки.

Для детальной оценки и качественного анализа содержания меди в штейне выполняется расчет основных статистических показателей моделирования для текущих значений массивов данных с помощью опции *Описательная статистика*, результаты которого выводятся в виде табл. 2. Статистические показатели можно разбить на несколько групп, характеризующие гистограмму: показатели формы, показатели расположения, показатели разброса.

Таблица 2

Технико-статистический анализ моделирования

Статистические показатели	Значения показателей	Округленные значения
Среднее	50,0087	50
Стандартная ошибка	0,603731485	0,6
Медиана	50,873	50,9
Мода	42,941	42,9
Стандартное отклонение	6,03731485	6
Дисперсия выборки	36,4491706	36,4
Эксцесс	–1,161093563	–1,16
Асимметричность	–0,115483744	–0,12
Интервал	19,881	19,9
Минимум	39,604	39,6
Максимум	59,485	59,5
Сумма	5000,869	5000,9
Счет-количество значений выборки	100	100
Наибольший (1)	59,485	59,5
Наименьший (1)	39,604	39,6
Уровень надежности (95,0 %)	1,197934247	1,2

Безусловно, все статистические показатели важны для принятия управленческих решений. Рассмотрим лишь интерпретацию показателей расположения и разброса, усилив предварительные выводы. К показателям расположения относятся среднее значение, медиана, мода, интервал.

Среднее или выборочное среднее (значение 50) является несмещенной и эффективной оценкой математического ожидания случайной величины Y и дает общее представление о нахождении центра выборки из 100 различных, но однородных значений моделирования.

Медиана делит выборку на две равные части и показывает, что половина полученных значений находится слева от значения 50, что больше критического уровня ($Y_{кр} \geq 45\%$).

Мода (значение 42,9) характеризует наиболее частое встречающееся значение содержания меди в штейне в выборке.

Показатели разброса характеризуют отклонение точек выборки относительно среднего значения.

Стандартное отклонение (значение 0,6), как и дисперсия (значение 36,4), — это мера разброса данных вокруг среднего; свидетельствуют о том, что большая часть результатов располагается в пределах 6 единиц от среднего, т. е. между значениями 44 и 56, что в процентном отношении составляет 47 % от всех значений содержания меди в штейне. Очевидно, что чем меньше дисперсия и стандартное отклонение, тем устойчивее технологический процесс.

По данным моделирования и оценки статистических показателей целесообразно выбирать оптимальные комбинации исходных данных процесса плавки концентрата в печах Ванюкова [3; 4], которые сосредоточены в интервалах от 45 до 60 % и соответствуют выполнению требований по эффективности технологического процесса и ресурсосбережения [5].

Мероприятия по управлению технологическим процессом сводятся к тому, чтобы снизить коэффициент стандартного отклонения известными приемами, улучшающими качество плавки [6].

Таким образом, метод Монте-Карло позволяет при расчете каждого сценария изменять одновременно значения всех факторных показателей, определять их оптимальное сочетание, соответствующее выбранному критерию качества, в целях принятия решения о прогнозировании и проведении процесса в условиях экономии энергоресурсов. Такую методику можно использовать для описания неопределенности различных технологических процессов, изменяя исходное содержание массива величин и диапазон их вариации, а также вводя новые.

Список источников

1. Агеев Н. Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 108 с.
2. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Курс статистического моделирования. М. : Наука, 1976. 320 с.

3. Автогенные процессы в цветной металлургии / В. В. Мечев [и др.]. М. : Металлургия, 1991. 413 с.
4. Кривандин В. А. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей / под ред. В. А. Кривандина. М. : МИСиС, 2001. 736 с.
5. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Хрестоматия энергосбережения / под ред. В. Г. Лисиенко. М. : Теплотехник, 2005.
6. ИТС 3—2019. Производство меди [Электронный ресурс] : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М. : Бюро НДТ, 2019. 314 с. URL: <https://www.rst.gov.ru/documentManager/rest/file/load/1577265175246> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 697

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСВЕННОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ С БОЛЬШОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

М. С. Шевелева¹, Е. А. Комаров²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ masha8119@mail.ru

Аннотация. В статье представлен анализ экономической целесообразности использования косвенного испарительного охлаждения в системах с большой холодильной мощностью. Приведены расчеты капитальных и эксплуатационных затрат для случая охлаждения воздуха только за счет компрессорно-конденсаторных блоков, а также для системы с использованием косвенного испарительного охлаждения.

Ключевые слова: холодоснабжение, косвенное испарительное охлаждение, охладитель, стоимость

ANALYSIS OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF INDIRECT EVAPORATIVE COOLING IN SYSTEMS WITH HIGH COOLING CAPACITIES

M. S. Sheveleva¹, E. A. Komarov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ masha8119@mail.ru

Abstract. In this paper, an analysis of the economic feasibility of indirect evaporative cooling in systems with a large cooling capacity is presented. Calculations of capital and operating costs for the case of system with compressor-condensing units, as well as for the system with indirect evaporative cooling are given.

Keywords: indirect evaporative cooling, air conditioning system, cooler, cost

Для поддержания определенных параметров среды на крупных производственных предприятиях необходимо использовать вентиляционные приточные системы с большой холодильной мощностью.

Как правило, такие системы потребляют большое количество электроэнергии, а их содержание и ремонт являются очень дорогостоящими, в то время как экономическая составляющая на крупных производственных предприятиях является приоритетной. По этой причине главным требованием к системам охлаждения, помимо обеспечения приемлемых параметров воздушной среды, является низкая стоимость эксплуатационных затрат.

Перспективным подходом к проектированию таких систем является использование косвенного испарительного охлаждения в системах кондиционирования воздуха.

Косвенное испарительное охлаждение — это процесс отвода тепла от потока воздуха через стенку теплообменника к воде, охлажденной испарением.

Характерная черта такого метода охлаждения воздуха — это использование двух потоков воздуха: основного (поток воздуха, который охлаждается) и вспомогательного (поток, который обеспечивает охлаждение воды). Начальные параметры двух потоков воздуха, как правило, равны [1].

Для косвенного испарительного охлаждения характерно использование градирни — аппарата, в котором при непосредственном контакте воды со вспомогательным потоком воздуха происходит испарительное охлаждение воды.

Общая схема работы такого метода заключается в том, что вода, охлажденная вспомогательным потоком воздуха посредством испарительного охлаждения, подается в поверхностный охладитель, охлаждающий основной поток приточного воздуха, который после подается через воздухораспределители в обслуживаемое помещение. В свою очередь, вода, отепленная основным потоком воздуха, возвращается в градирню для последующего охлаждения и повторения всего цикла.

Проведем сравнительный анализ для условных исходных данных: требуемая холодильная мощность — 750 кВт; температура наружного воздуха в теплый период года — 32 °С; период требуемого охлаждения — с мая по октябрь.

В качестве условной установки возьмем приточную установку с минимальным набором секций: воздушный клапан, фильтр, жидкостный

воздухоохладитель (для 1-го варианта — 2 шт., для 2-го варианта добавляем еще один для мокрой градирни) и вентилятор.

Определим капитальные и эксплуатационные затраты для двух вариантов и сравним полученные результаты.

Капитальные затраты включают в себя стоимость оборудования и монтаж оборудования. Условно, стоимость монтажа оборудования принимается равной 40 % от стоимости оборудования.

Эксплуатационные затраты включают в себя ежегодные затраты на тепловую и электрическую энергии, затраты на текущий и капитальный ремонты, а также затраты на заработную плату и определяются согласно формуле:

$$И = Т + Э + P_k + P_t + З + У,$$

где T — затраты на тепловую энергию, р./г.; $Э$ — затраты на электрическую энергию, р./г.; P_k — затраты на капитальный ремонт, р./г.; P_t — затраты на текущий ремонт и обслуживание, р./г.; $З$ — затраты на заработную плату обслуживающего персонала, р./г.; $У$ — затраты на управление, технику безопасности, охрану труда и др., р./г. [2].

Затраты на заработную плату ($З$), управление, технику безопасности и охрану труда ($У$) в обоих вариантах будут одинаковыми, что позволяет их не учитывать в расчете.

Затраты на электрическую энергию зависят от мощности двигателя, продолжительности работы систем, а также от тарифа на электроэнергию в условном городе и определяются по формуле:

$$Э = N_{уст} k H_r C_э,$$

где $N_{уст}$ — установочная мощность двигателей, кВт; k — коэффициент загрузки, принимаем равным 0,4 из расчета работы установок только в рабочую смену; H_r — продолжительность работы системы, принимаем равной 3600 ч/г.; $C_э$ — тариф на электроэнергию, принимаем равным 3,41 р./(кВт·ч).

Усредненные затраты на капитальный и текущий ремонты принимаем равными 10 % от капитальных затрат K .

Рассмотрим 1-й вариант системы. В этом варианте охлаждение воздуха происходит только за счет компрессорно-конденсаторных блоков.

Стоимость условной установки составляет 2289 тыс. р. с учетом НДС; стоимость компрессорно-конденсаторных блоков, а также всех аксессуаров к ним составляет 3517,8 тыс. р. Следовательно, капиталъ-

ные затраты с учетом монтажа будут составлять 8129,52 тыс. р., а сумма текущего и капитального ремонта будет равна 812,95 (тыс. р.)/г.

Затраты на тепловую энергию в этом случае будут равны 0, т. к. система автономна.

Воспользуемся формулами, представленными выше, чтобы определить эксплуатационные затраты. При установленной мощности установки и компрессорно-конденсаторных блоков 108,5 кВт, затраты на электроэнергию будут равны $\Theta = 532,78$ (тыс. р.)/г., следовательно, эксплуатационные затраты $И = 1345,73$ (тыс. р.)/г.

Рассмотрим 2-й вариант системы с использованием косвенного испарительного охлаждения.

Принципиальная разница в том, что часть тепла мы будем снимать с помощью мокрой градирни фирмы «Росинка». За счет этого в приточной установке появляется дополнительная секция воздухоохлаждителя, следовательно, стоимость условной приточной установки увеличивается; примем ее равной 2652,6 тыс. р.

Из общей холодильной энергии 195 кВт будет сниматься с помощью мокрой градирни, а остальные 555 кВт так же, как и в 1-м варианте, с помощью компрессорно-конденсаторных блоков (ККБ). Стоимость мокрой градирни будет составлять 665 тыс. р. Стоимость ККБ — 2758,9 тыс. р. Следовательно, капитальные затраты будут равны $К = 8507,1$ тыс. р.

Для подсчета эксплуатационных затрат нужно учитывать, что мокрая градирня нуждается в подпитке. Такая подпитка производится водой из технического водопровода. В этом случае суммарные потери воды, требующие восполнения, составляют 0,29 м³/ч, что в перерасчете на год будет равным 417,6 м³/ч, тариф на техническую воду примем 14,5 р./м³.

Усредненные затраты на капитальный и текущий ремонты принимаем равными 10 % от капитальных затрат — 850,71 (тыс. р.)/г.

Суммарная электрическая мощность составляет 87,5 кВт, следовательно, воспользовавшись формулами, представленными выше, получаем, что эксплуатационные затраты будут составлять $И = 1286,43$ (тыс. р.)/г.

Из результатов расчетов этих двух вариантов можно сделать вывод, что использование испарительного охлаждения при небольшом увеличении капитальных затрат приводит к снижению эксплуатационных расходов.

Выполненные расчеты являются предварительными, в дальнейшем планируется провести более детальный анализ.

Список источников

1. Кокорин О. Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования. М. : Изд-во АСВ, 2013. 256 с.
2. Богуславский Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. М. : Стройиздат, 1985. 337 с.

УДК 621.3

ПРИМЕНЕНИЕ РЭН-МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ДОСТОВЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ УСТРОЙСТВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С. Е. Шендер¹, А. В. Паздерин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ s.e.shender@urfu.ru

Аннотация. В работе представлен метод эквивалентирования электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе РЭН-моделей. Проанализирована возможность применения таких моделей для решения задачи достоверизации данных устройств синхронизированных векторных измерений. Показано, что применение РЭН-моделей для решения этой задачи дает приемлемые результаты. Приведены погрешности расчетных значений узловых напряжений, полученные в исследовании. Показана возможность обнаружения недостоверных данных устройств синхронизированных векторных измерений.

Ключевые слова: эквивалентирование ЭЭС, синхронизированные векторные измерения, достоверизация данных, система мониторинга переходных режимов

APPLICATION OF REW-MODELS IN THE PROBLEM OF DATA VERIFICATION OF SYNCHRONIZED MEASUREMENT DEVICES

S. E. Shender¹, A. V. Pazderin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ s.e.shender@urfu.ru

Abstract. The paper presents a method for EES equivalence based on REW models. The possibility of using REW-models for solving the problem of verifying the data of devices for synchronized vector measurements is analyzed. It is shown that the use of REW-models for solving this problem gives acceptable results. The errors of the calculated values of the nodal stresses obtained in the study are given. The possibility of detecting invalid data of synchronized vector measurements devices is shown.

Keywords: EES equivalence, synchronized vector measurements, verification of data, transient monitoring system

Развитие технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволяет изменить и усовершенствовать подходы к определению параметров эквивалентов электроэнергетических систем (ЭЭС). Определение их фактических параметров позволяет улучшить точность и скорость решения многих задач управления режимами ЭЭС [1]. Схема РЭН является радиальной (Р), эквивалентной (Э) замещающей схемой и зависит только от состояния ее граничных узлов, т. е. независима (Н) от остальной части схемы [2].

Линейная часть включает в себя проводимости (сопротивления) ветвей, для которых характерна линейная зависимость тока от напряжения [2]:

$$I = YE \quad (1)$$

Нелинейная часть системы состоит из ветвей различной природы, связывающих узлы линейной части с нейтральным узлом (или землей). Следует отметить, что рассматриваемые ветви не могут быть отображены проводимостями (за исключением поперечных П-образных схем замещения) [3].

Математическая модель рассматриваемой подсхемы описывается уравнением:

$$[i] = [y] \cdot [e]. \quad (2)$$

Сгруппировав уравнения матричного выражения (2), имеем:

$$\begin{bmatrix} r & i_r \\ c & i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{rr} & y_{rc} \\ y_{cr} & y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_r \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Моделирование нагрузок с помощью соответствующих проводимостей позволяет исключить из числа искоемых переменных токи в нагрузочных узлах. С учетом этого имеем:

$$\begin{bmatrix} i_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{rr} & y_{rc} \\ y_{cr} & y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_r \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) исключаются переменные e_c . При этом оставшиеся элементы матрицы $[y]$ пересчитываются по формулам:

1) для недиагональных элементов:

$$y_{mn(\text{нов})} = y_{mn(\text{стар})} - \frac{y_{ms}y_{ns}}{y_{ss}}; \quad (5)$$

2) для диагональных элементов:

$$y_{mm(\text{нов})} = y_{mm(\text{стар})} - \frac{y_{ms} y_{ms}}{y_{ss}}. \quad (6)$$

В результате исключения всех узлов группы с получим:

$$i_r = [y_r] \cdot [e_r]. \quad (7)$$

Уравнение узла i , входящее в систему (7), является основой построения РЭН-схемы для узла i . В выражении (7) выделим это уравнение от других:

$$\begin{bmatrix} i_g \\ i_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{gg} & y_{gi} \\ y_{ig} & y_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_g \\ e_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Запишем отдельно уравнение узла i :

$$i_i = y_{i1}e_1 + y_{i2}e_2 + \dots + y_{ii}e_i. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет строить эквивалентную РЭН-схему.

Пусть в генераторных узлах исходной исследуемой сети установлены системы мониторинга переходных режимов (СМПР). Посредством предложенного алгоритма можно исключить нагрузочные узлы из сети, достигнув топологии, в которой генераторные узлы связаны между собой. Далее на основе закона Ома можно достоверизировать данные СМПР по каждому из генераторных узлов путем расчета в РЭН-эквиваленте каждого напряжения генераторного узла n в сети от других $(n - 1)$ узлов. Таким образом, достигается избыточность информации об узловых напряжениях в генераторных узлах, что позволяет повысить точность исходных данных СМПР, а также выявить недостоверные данные:

$$\begin{aligned} y_{11\text{new}} &= y_{11} - \frac{y_{12}y_{12}}{y_{22}} \\ y_{33\text{new}} &= y_{33} - \frac{y_{23}y_{23}}{y_{22}} - \frac{y_{34}y_{34}}{y_{44}} \\ y_{55\text{new}} &= y_{55} - \frac{y_{45}y_{45}}{y_{44}} \\ y_{13\text{new}} &= -\frac{y_{12}y_{23}}{y_{22}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$y_{35\text{new}} = -\frac{y_{34}y_{45}}{y_{44}}$$

$$y_{15\text{new}} = y_{15}$$

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица

Результаты расчета узловых напряжений

Параметр	Узел № 1	Узел № 3	Узел № 5
$E_{\text{изм. 1}}, \text{кВ}$	220,130	219,840	219,870
$E_{\text{расч. 1, 3}}, \text{кВ}$	219,406	220,440	220,658
$E_{\text{расч. 1, 5}}, \text{кВ}$	219,473	219,900	219,783
$E_{\text{сред. 1}}, \text{кВ}$	219,670	220,060	220,104
Погрешность расчета, %	+0,209	−0,100	−0,106

Из представленных результатов видно, что погрешности расчета узловых напряжений генераторных узлов 1, 3, 5 составили +0,209 %, −0,100 %, −0,106 % соответственно. Уровни погрешностей находятся на уровне <0,5 %. Важно отметить, что чем выше избыточность информации по каждому узлу (т. е. количество генераторных узлов, посредством которых возможна достоверизация каждого из них), тем ниже будет уровень погрешности вычисления узлового напряжения в исследуемом узле. При увеличении погрешности расчета напряжения по какому-либо узлу становится очевидным, что определенное расчетное значение обуславливает такую ошибку. С учетом того, что расчет производится по каждому узлу отдельно, становится возможным идентифицировать недостоверные измерения устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ).

Список источников

1. IEEE Std C37.118–2005. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems [Electronic resource]. URL: https://standards.ieee.org/standard/C37_118–2005.html (date of access: 25.11.2020).
2. Димо П. Модели РЭИ и параметры режима. Объединенные энергосистемы. М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Димо П. Узловой анализ электрических систем. М. : Мир, 1973.

УДК 621.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕРМИНАЛАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

С. Е. Шендер¹, А. В. Паздерин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ s.e.shender@urfu.ru

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ методов расчета параметров векторов тока и напряжения на базе дискретного преобразования Фурье (ДПФ), а также с применением операции квадратурного умножения. Проанализированы метод расчета частоты по скольжению фазы и метод фазовой автоподстройки частоты. Рассмотрена возможность совершенствования классического преобразования Фурье путем введения в его вычислительный тракт гибкой обратной связи по частоте. Показано, что метод на базе операции квадратурного умножения является более предпочтительным с точки зрения времени реакции вычислителя, погрешности однородности переходного процесса.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, векторные измерения, ортогональные составляющие, моделирование алгоритмов

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATION OF CURRENT AND VOLTAGE VECTORS PARAMETERS ON MICROPROCESSOR TERMINALS OF RELAY PROTECTION AND EMERGENCY AUTOMATION

S. E. Shender¹, A. V. Pazderin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ s.e.shender@urfu.ru

Abstract. The paper presents a comparative analysis of methods for calculating the parameters of current and voltage vectors based on DFT, as well as using the

operation of quadrature multiplication. The method for calculating the frequency from the phase slip and the method of phase-locked loop frequency are analyzed. The possibility of improving the classical Fourier transform by introducing a flexible frequency feedback into its computational path is considered. It is shown that the method based on the operation of quadrature multiplication is more preferable from the point of view of the reaction time of the calculator, the error in the homogeneity of the transient process.

Keywords: relay protection and automation, vector measurements, orthogonal components, modeling algorithms

Большая часть алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики в качестве входных параметров использует векторы токов и напряжений. Векторы могут быть поданы в алгоритм как в алгебраической, так и в тригонометрической формах. Алгоритм расчета ортогональных составляющих вектора на базе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) заключается в выполнении ДПФ исследуемого сигнала и синусоиды базовой частоты с последующей их круговой сверткой.

Базовая синусоида генерируется по формуле:

$$y(t) = \sin(2\pi f_{\text{ном}} n T_d). \quad (1)$$

Дискретное прямое преобразование Фурье реализуется следующим образом [1]:

$$S(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{\frac{-j2\pi nk}{N}}. \quad (2)$$

Свертка производится по теореме о свертке [2]:

$$Y_w = \dot{Y}_{w1} \hat{Y}_{w2}. \quad (3)$$

Алгоритм расчета ортогональных составляющих вектора с использованием операции квадратурного умножения заключается в выполнении умножения отсчетов выборки входного сигнала на отсчеты опорного синуса и косинуса. В результате умножения имеем:

$$\begin{aligned} \text{Re}(t) &= \sin(\omega_0 t) X_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{X_m}{2} \left[\cos((\omega_0 - \omega)t - \varphi_0) - \cos((\omega_0 + \omega)t + \varphi_0) \right] \\ \text{Im}(t) &= \cos(\omega_0 t) X_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{X_m}{2} \left[\sin((\omega_0 - \omega)t - \varphi_0) - \sin((\omega_0 + \omega)t + \varphi_0) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве сглаживающей оконной функции используется окно Дольфа — Чебышева с настраиваемым уровнем боковых лепестков

спектра. На практике принято использовать следующую расчетную формулу частоты [3]:

$$f = f_{\text{ном}} + \frac{d(\Delta\delta)}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (5)$$

Разностный угол двух соседних векторов вычисляется по формуле:

$$\Delta\delta = \tan^{-1}(\dot{V}[n]\hat{V}[n-1]). \quad (6)$$

При реализации формулы (6) в терминалах микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) она переписывается в ортогональных составляющих следующим образом:

$$\Delta\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Re}[n]\text{Im}[n-1] - \text{Re}[n-1]\text{Im}[n]}{\text{Re}[n-1]\text{Re}[n] + \text{Im}[n-1]\text{Im}[n]}\right). \quad (7)$$

Скольжение, получаемое в формуле (5), следует фильтровать при помощи фильтра нижних частот (ФНЧ). В нашем случае используется КИХ фильтр (фильтр с конечной импульсной характеристикой), рассчитанный методом оконного сглаживания.

Вычислительный контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) представляет собой следящую систему автоматического регулирования, выполняющей подстройку частоты опорного сигнала по отклонению фазы входного сигнала от фазы опорного сигнала.

В качестве выходного фильтра был использован БИХ фильтр (фильтр с бесконечной импульсной характеристикой) второго порядка с частотой среза в 10 Гц и коэффициентом демпфирования 0,9.

Имитация работы описанных алгоритмов расчета частоты и ортогональных составляющих производилась в прикладном комплексе Simulink. Частоты дискретизации выборки и результатов расчета были выставлены такими же, как на устройстве РЗА типа УСВИ ТПА-01 производства ООО «Прософт-Системы».

Скольжение считается через ортогональные составляющие по формуле (7). Далее оно фильтруется КИХ фильтром 10-го порядка с частотой среза 60 Гц. Входной сигнал вместе с опорным раскладывается в ряд Фурье. Далее производится круговая свертка спектров входного сигнала и опорного, в результате чего получаются ортогональные составляющие и фазовый угол входного сигнала относительно опорного сигнала. Частота считается по скольжению фазы и заводится обратной связью в блок ДПФ входного сигнала.

Таким образом, алгоритм вычислителя на базе операции квадратурного умножения имеет более однородный переходный процесс, нежели вычислитель на базе ДПФ. Это обусловлено тем, что вычислитель на базе ДПФ использует гибкую обратную связь по частоте, что приводит к непрерывному изменению периода разложения входного сигнала и, соответственно, скачкам фазы, амплитуды и частоты. При этом в вычислителе на базе операции квадратурного умножения указанных неоднородностей не наблюдается ввиду полной независимости трактов вычисления частоты и ортогональных составляющих. Однако в вычислителе на базе операции квадратурного умножения могут наблюдаться погрешности измерения амплитуды, а также ее флуктуации на крайних рабочих частотах [45; 55] Гц, связанные с неполным подавлением сигнала удвоенной частоты и завалами амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) квадратурных фильтров. С практической точки зрения вычислитель на базе операции квадратурного умножения является наиболее предпочтительным с точки зрения времени реакции, погрешности однородности переходного процесса. Проблемы, связанные с завалами АЧХ квадратурных фильтров и флуктуацией амплитуды на крайних рабочих частотах в [45; 55] Гц могут быть решены путем использования специальных компенсационных функций и (или) подстройкой ширины окна наблюдения.

Список источников

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М. : Мир, 1978. 848 с.
2. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dsplib.ru/index.html> (дата обращения: 25.11.2020).
3. Документация MATLAB [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.exponenta.ru/matlab/index.html> (дата обращения: 25.11.2020).

УДК 621

НИЗКОСКОРОСТНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

**С. И. Шкрылев¹, Ю. Г. Марченко², И. А. Калинин³,
В. В. Савченко⁴, В. А. Седунин⁵**

^{1,2,3,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ savok107@mail.ru

Аннотация. В работе представлены проблемы значительного уровня финансовых и временных затрат на разработку новых осевых компрессоров. Авторы предлагают разработать новый испытательный стенд, который позволит повысить число высококвалифицированных специалистов в области инженерного дела. Предприятия, в свою очередь, смогут сократить финансовые издержки на разработку оборудования.

Ключевые слова: испытательный стенд, компрессор, производственный процесс, технические решения

LOW SPEED AXIAL COMPRESSOR TEST BENCH

**S. I. Shkrylev¹, J. G. Marchenko², I. A. Kalinin³,
V. V. Savchenko⁴, V. A. Sedunin⁵**

^{1,2,3,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ savok107@mail.ru

Abstract. The paper presents the problems of financial level and time costs for the development of new axial compressors, are being examined. The authors propose to develop a new test bench that will increase the number of highly qualified specialists in the field of engineering. Enterprises, in turn, will be able to reduce the financial costs of developing equipment.

Keywords: test bench, compressor, production process, technical solutions

Известно, что в последние годы Россия стремится решить вопрос сокращения отставания в технологических отраслях,

в т. ч. в турбиностроении и образовании. На рис. 1 показано, что разработка и запуск в серийное производство новых установок занимает в целом от 2 до 5 лет с затратами до 1 млрд р. Нынешний подход связан с высокими рисками, т. к. многие технические решения удастся испытать лишь на финальных стадиях разработки.

Однако можно значительно уменьшить временные и денежные издержки за счет проектирования осевых компрессоров (как самого сложного узла турбины) с использованием испытательных стендов.

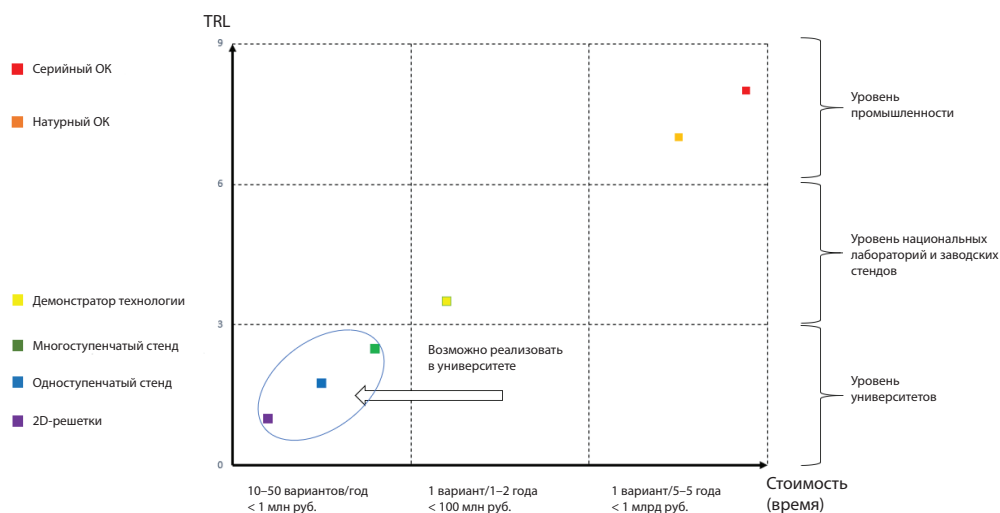


Рис. 1. График технологической готовности изделия

В Уральском федеральном университете (УрФУ) может быть реализован проект создания таких стендов, которые позволят отрабатывать до 50 различных технологических решений для промышленных предприятий, а также в процессе обучения готовить высококвалифицированных специалистов в области таких испытаний.

В связи с отсутствием в России испытательных стендов приходится проводить испытания на реальных установках. Такие испытания являются дорогостоящими и опасными. В качестве решения предлагается проект создания низкоскоростного стенда осевых компрессоров.

На рис. 2 представлен прототип такого стенда.

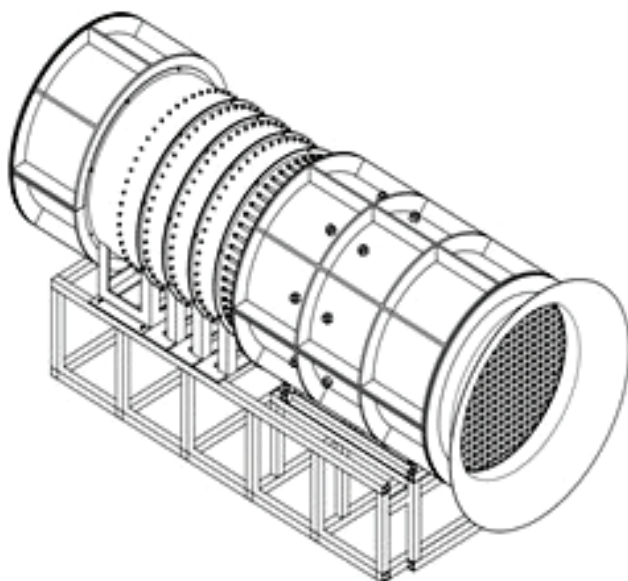


Рис. 2. Прототип испытательного стенда осевых компрессоров

В качестве ключевой особенности можно отметить несколько характерных особенностей:

- 1) большой диаметр стенда, который позволяет исследовать аэродинамику лопаток увеличенного масштаба, что позволяет получить более точную картину распределения параметров потока по высоте ступени;
- 2) широкое применение узлов и деталей, полученных при помощи аддитивных технологий, что снижает время и затраты на изготовление такого стенда [1];

3) применение генеративного дизайна лопаток. Суть такого дизайна заключается в том, что искусственный интеллект самостоятельно формирует облик деталей под заданные конструктором условия ее будущего функционирования [2]. При этом компьютер проводит поиск во всем пространстве возможных решений и предлагает конструктору десятки, а иногда сотни различных вариантов исполнения деталей — легких, в то же время прочных. На рис. 3 продемонстрирован пример использования генеративного дизайна.

Дополнительной особенностью является использование аддитивных технологий, позволяющих сократить время на изготовление стенда.

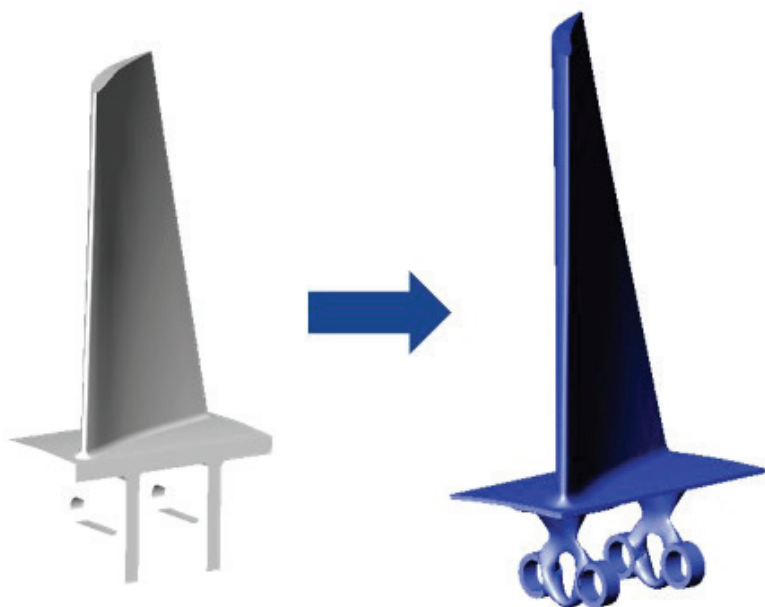


Рис. 3. Генеративный дизайн лопаточного аппарата

В качестве потенциального эффекта рассматривается отработка новых технических решений для промышленных предприятий в целях сокращения экономических и временных затрат на разработку установок. Главным же результатом станет проектирование установок с необходимой точностью, что повысит уровень энергоэффективности осевых компрессоров в России.

Список источников

1. Ревзин Б. С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.
2. Седунин В. А., Блинов В. Л., Шепелина Я. П. Моделирование физических процессов в турбомашинах / под общ. ред. В. А. Седунина. Екатеринбург : УрФУ, 2016. 123 с.

УДК 621.438

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПГУ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПРИМЕНЕНИЕМ АБХМ

Д. И. Щеглов¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ k.famin10@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ режимов работы ПГУ-230 в летний эксплуатационный период. Показано, что за счет охлаждения воздуха перед компрессором газотурбинной установки (ГТУ) с помощью абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) возможно поддержание расчетных энергетических характеристик парогазовой установки независимо от температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: парогазовые установки, охлаждение воздуха, энергетические показатели, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина

INCREASING THE ENERGY INDICATORS OF CCGT UNITS IN SUMMER USING LITHIUM-BROMIDE REFRIGERATING MACHINE

D. I. Shcheglov¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ k.famin10@mail.ru

Abstract. The analysis of the modes of operation of CCGT-230 in the summer operational period. It is shown that by cooling the air in front of the GTP compressor using ABCM, it is possible to maintain the calculated energy characteristics of the combined-cycle gas plant regardless of the outdoor air temperature.

Keywords: combined-cycle gas installations; air cooling; energy indicators; absorption lithium-bromide refrigerating machine

Общеизвестно, что энергетические характеристики парогазовой установки (ПГУ) зависят от климатических и погодных условий. Наибольшее влияние оказывает температура [1].

ПГУ в летний эксплуатационный период не приспособлены к ведению суточного графика нагрузки. Дефицит мощности летом в энергосистеме покрывается паросиловыми установками, для которых климатические условия не создают значительных препятствий при генерации требуемой мощности.

В теплый период года теплофизические свойства воздуха меняются: снижение плотности воздуха вследствие повышения температуры приводит к снижению электрической мощности газотурбинной установки (ГТУ) и, как следствие, к ограничению участия ПГУ в нормированном первичном регулировании частоты в энергосистеме, а также увеличению удельного расхода топлива [2]. Например, при повышении температуры подаваемого в компрессор ГТУ воздуха на 20°C мощность установки снижается на 25 %. В этих случаях целесообразно охлаждение воздуха на входе в ГТУ (TIAC — Turbine Inlet Air Chilling). Система TIAC предполагает применение испарительных охладителей, мелкодисперсное распыление воды за фильтром [3] или использование холодильных машин [4]. Последний вариант наиболее эффективен, т. к. позволяет получить максимальную глубину охлаждения, в т. ч. достижение температур ниже точки росы.

В условиях теплоэлектроцентралей наличие потоков тепла (в т. ч. вторичного) различного потенциала обуславливает энергоэффективное применение абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ). Энергетическим ресурсом для их работы может служить тепло уходящих газов, мятый пар или сетевая вода. Результат достигается внедрением воздухоохладителей в существующее комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ), в котором нагрев воздуха замещается охлаждением летом.

Применение АБХМ для охлаждения воздуха для ПГУ наиболее актуально для районов с резким колебанием температуры наружного воздуха, характерными, например, для Екатеринбурга, находящегося в зоне границы умеренно континентального климата с континентальным, с характерной резкой сменой погодных условий и возможным повышением температуры летом до $+35^{\circ}\text{C}$ и выше. Самая высокая температура, отмеченная в Екатеринбурге за весь период метеонаблюдений, составила $+38,8^{\circ}\text{C}$.

Мощность АБХМ определяется требованиями к значению температуры охлаждаемого воздуха при заданной влажности. В большинстве случаев расчетный интервал температур при определении мощности АБХМ задается от среднемесячной температуры теплого периода до $+15^{\circ}\text{C}$. При

окончательном выборе оптимальную холодопроизводительность АБХМ следует определять по критерию минимизации приведенных затрат.

Эффект применения АБХМ в системе ТИАС ПГУ определяется климатическими условиями, выбором источника теплоты, характеристиками ГТУ и паровой турбины, конструкцией комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) и выбором вспомогательного оборудования (градирен, насосных групп), а также схемой циркуляции теплоносителей в каждом контуре и системе в целом. В каждом конкретном случае применения АБХМ в системе ТИАС ПГУ используется индивидуальное техническое решение (табл. 1) [5].

Таблица 1

Примеры применения АБХМ в системе ТИАС ПГУ

Локализация	Мощность ПГУ, МВт	Суммарная мощность АБХМ	Количество единиц оборудования
Астраханская ГРЭС 2	110	7,4	2
Буденновская ПГУ-ТЭС	135	10,5	1
Астраханская ПГУ-235	235	15,2	4

Реализованное «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго» [5] техническое решение на Астраханской ПГУ-235 (рис. 1) потенциально может быть адаптировано к промплощадке теплоэнергоцентрали (ТЭЦ) «Академическая» (Екатеринбург), на территории которой установлен парогазовый моноблок ПГУ-230 с газовой турбиной GT13E2 фирмы Alstom Power, ввиду близких значений мощности блоков.

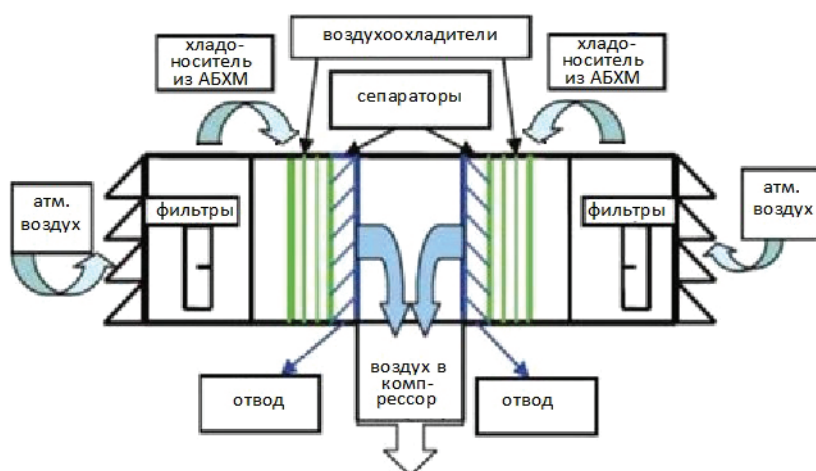


Рис. 1. Схема охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ ПГУ-235 в теплообменниках КВОУ

Средняя температура самого теплого месяца — июля 2020 г. в Астрахани составила $+35^{\circ}\text{C}$, максимальная — $+40^{\circ}\text{C}$. В этот же период на промплощадке ТЭЦ «Академическая» максимальная температура соответствовала метеоданным, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Сведения по температурам наружного воздуха

Промежуток	Дата	Время	Температура, $^{\circ}\text{C}$
01.05.2019–01.09.2019	13.07.2019	16:04	33,35
01.05.2020–01.09.2020	16.07.2020	16:06	37,02

Таким образом, близость максимальных температур воздуха, наряду с мощностью, указывает на возможность использования в летний период оборудования, применяемого в системе охлаждения Астраханской ПГУ-235, когда ГТУ блока ПГУ-230 не может выйти на номинальные показатели 182,2 МВт.

При расходе воздуха на ГТУ GT13E2 585,14 кг/с и снижении его температуры от $+37^{\circ}\text{C}$ до расчетной $+15^{\circ}\text{C}$ требуемая мощность АБХМ составляет 11,93 МВт. По аналогии ПГУ-235 в качестве теплоносителя для АБХМ целесообразно использовать пар из теплофикационных отборов паровой турбины КТ-63—8,8 с давлением (максимальным) 3,5 бар. Расчетный расход пара 11611 кг/ч.

Необходимая мощность может быть покрыта проверенными в эксплуатации на ПГУ-ТЭС АБХМ Shuangliang [4].

Четыре АБХМ Shuangliang ST-1157 эксплуатируются на Астраханской ПГУ-235 с 2016 г. Единичная мощность этих двухступенчатых АБХМ составляет 3,8 МВт. Таким образом, четыре машины суммарной мощностью 15,2 МВт покрывают потребность ТЭЦ «Академическая» с запасом 27 %.

Прирост располагаемой электрической мощности в летний период может достигнуть 17,4 МВт, дополнительная реализация электроэнергии 86,5 (МВт·ч)/г., расчетный экономический эффект 173,2 млн р./г., что делает проект коммерчески привлекательным.

Список источников

1. Ибрагим А.А. И. Оптимизация параметров ПГУ и ГТУ и систем охлаждения наружного воздуха ПГУ и ГТУ для территорий с жарким климатом : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01 / Альрави Аммар И. Ибрагим. Иркутск, 2012. 108 с.

2. Цхяев А. Д., Кузьмина Т. Г. Использование АБХМ в системах охлаждения воздуха на входе в компрессор ГТУ [Электронный ресурс] // Турбины и Дизели. 2020. № 5. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/3851> (дата обращения: 29.11.2020).

3. Буров В. Д., Теплов Б. Д. Повышение номинальной мощности и энергетической эффективности ПГУ в условиях высоких температур наружного воздуха путем впрыска воды в газоздушный тракт ГТУ // Молодой ученый. 2015. № 23.1 (103.1.). С. 11–14.

4. Абсорбционные холодильные машины, АБХМ Shuangliang [Электронный ресурс]. URL: <http://shuangliang.ru> (дата обращения: 29.11.2020).

5. Парогазовая установка (ПГУ) 235 [Электронный ресурс]. URL: <https://astrahanenergo.lukoil.ru/ru/About/GeneratingFacilities> (дата обращения: 29.11.2020).

Раздел 2
Ресурсосбережение
и повышение экологической
эффективности

УДК 666.122.2

КВАРЦЕВЫЙ ПЕСОК ИРАКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК КОМПОНЕНТ ШИХТЫ ДЛЯ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ф. Х. Ф. Аль-Саиди¹, А. А. Кунгурова², С. Г. Власова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ s.g.vlasova@urfu.ru

Аннотация. В работе рассматривается возможность использования кварцевого песка месторождения Анбар в Ираке в качестве исходного сырья для листовых стекол крупнотоннажного производства; сделаны дисперсионный и химический анализы проб песка. Показано, что обогащение путем промывки, оттирки и магнитной сепарации повышает выход основного вещества, содержание примесных оксидов железа уменьшается с 0,2 до 0,1. Синтезированы стекла с содержанием оксида кремния до 72 мас. %.

Ключевые слова: кварцевый песок, обогащение, оксид кремния, примеси, гранулометрический состав, химический анализ, стекло

QUARTZ SAND OF THE IRAQI DEPOSIT AS A CHARGE COMPONENT FOR GLASS PRODUCTION

F. H. F. Al-Saidi¹, A. A. Kungurova², S. G. Vlasova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ s.g.vlasova@urfu.ru

Abstract. The paper considers the possibility of using the quartz sand of the Anbar deposit in Iraq as a raw material for large-tonnage glass sheets and made dispersion and chemical analyses of sand samples. It is shown enrichment by washing, wiping and magnetic separation increases the yield of the main substance, the content of impurity iron oxides decreases from 0.2 to 0.1. Glass with silicon oxide content up to 72 wt. % is synthesized.

Keywords: quartz sand, beneficiation, silicon oxide, impurities, particle size distribution, chemical analysis, glass

Во всем мире отсутствует материал, способный равноценно заменить стекло в оконных проемах, фасадах, витринах, смотровых окнах транспорта, авиации, приборостроении и т. д. Для производства стеклоизделий широкого ассортимента в первую очередь необходимо иметь сырьевые материалы соответствующего качества.

В Ираке имеются огромные песчаные пустыни, запасы песка составляют миллионы тонн, в провинции Анбар — до 86 млн т стекольных песков. Эти запасы целесообразно обратить во благо страны, используя ресурсосберегающие технологии.

Кварцевые пески, которые в России соответствуют ГОСТ 22551–77 «Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности», могут быть использованы в качестве исходного сырья для стекол крупнотоннажного производства [1]. Требования российских стандартов ограничивают размер зерен песка после его просева диапазоном 0,1...0,8 мм. Для получения листового стекла флоат-методом состав должен соответствовать следующему соотношению компонентов (мас. %): SiO_2 —72; Na_2O — 14; CaO — 9; MgO — 3,5; Al_2O_3 —1,5; причем ограничение по Fe_2O_3 не более 0,1 мас. % [2].

Важным критерием для получения качественной однородной стекломассы с определенными характеристиками является химический состав и гранулометрия сырьевых материалов. Генезис песка определяет минералогический состав примесей, которые существенно отличаются по своим физическим и технологическим характеристикам и могут влиять на технологический процесс варки и качество стекла [3].

Цель исследовательской работы — анализ песка Ирака месторождения Анбар, его обогатимости и выявление технологических особенностей применения для производства стекломатериалов.

Применяемые методики исследования песка: рентгено-флуоресцентный анализ; ситовой анализ — определение гранулометрического, или фракционного, состава песка, разновидность дисперсионного анализа [4]; рентгенофазовый анализ. Экспериментальные результаты ситового анализа по дисперсности и содержанию оксида железа в каждой фракции песка Ирака представлены в таблице.

Таблица

Зерновой состав кварцевого песка Ирака и количество оксида железа

Диапазон размеров частиц, ост. на ситах, мм	Масса частиц каждой фракции, г в 100 г песка	Оксид железа в каждой фракции (Fe_2O_3), масс. %
0,0...0,1	2,34	4,65
0,1...0,2	28,2	0,52
0,2...0,3	58,64	0,23
0,3...0,6	9,92	0,19
0,6...1,2	0,98	0,48

Кристаллические фазы идентифицировали с помощью рентгенофазового анализа. Минералогический состав примесей в песке, в интервале фракций 0,2...0,3 мм, представлен на рис. 1.

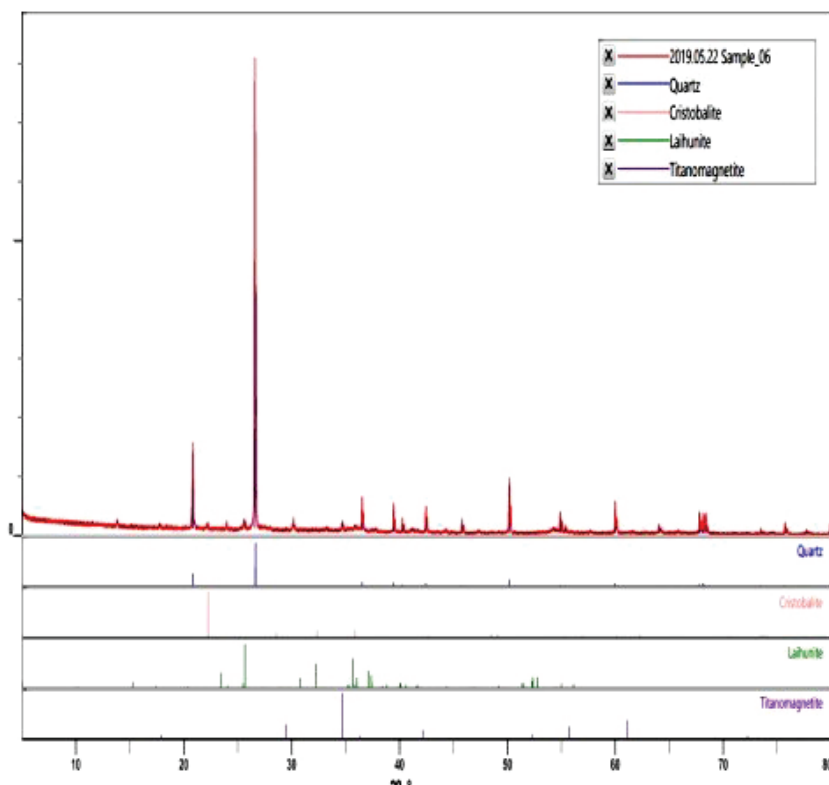


Рис. 1. Рентгенофазовый анализ примесей в песке Ирака.
Минералогический состав: quartz, cristobalite, laihunite ($\text{Fe}_{4,74}\text{O}_{12}\text{Si}_3$),
titanomagnetite ($\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Ti}$)

Ряд тяжелых минералов (магнетита, ильменита, силлиманита, гематита, рутила, турмалина и др.), многие из которых являются тугоплавкими, содержатся преимущественно в мелкой фракции песка [2; 4]. Ее необходимо отсеивать, чтобы не задерживать процесс стекловарения и не увеличивать вероятность брака в изделии.

Согласно анализу (см. табл.) 86 % песка имеет размеры 0,2 ... 0,3 мм. Следовательно, песок можно отнести к группе мелко- и среднезернистых [4], а среднее значение примесей железа составляет примерно 0,23 % без применения магнитной сепарации.

Методы обогащения — промывка, флотооттирка, магнитная сепарация — применили для очистки песка от вредных примесей. Оксиды железа могут присутствовать внутри зерен кварца в виде включений или твердых растворов. Железо, входящее в кристаллическую решетку кварца в виде твердых растворов, практически удалить не удастся, и оно определяет предел обогатимости песка [5]. В иракском песке после обогащения содержание оксида железа уменьшилось до 0,1 мас. %

Из необогащенного песка и обработанного очищенного синтезированы стекла оконного состава при температуре 1480 °С. В первом случае есть голубой оттенок. Такое стекло можно применять в мебельной промышленности. В дальнейшем необходимо использовать при стекловарении обесцвечиватели, чтобы получить стекло с высоким коэффициентом светопропускания.

Список источников

1. Минько Н. И., Нарцев В. М., Мелконян Р. Г. История развития и основы технологии стекла. Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. 395 с.
2. Гулюян Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий. Владимир : Транзит-ИКС, 2015. 712 с.
3. Химическая технология стекла и ситаллов / под общ. ред. Н. М. Павлушкина. М. : Стройиздат, 1983. 427 с.
4. Минько Н. И., Ячъя М. Я., Гридякин К. Н. Генезис песка, пригодного в технологии стекла // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014. № 2. С. 127–131.
5. Технология стекла : справочные материалы / под ред. П. Д. Саркисова [и др.] Москва : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 647 с.

УДК 621.313.17:621.928

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ДОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛОМА И ОТХОДОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

С. И. Астапчик¹, Е. О. Лаптева², А. Ю. Коняев³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ semen_rus_99@mail.ru

Аннотация. В работе обоснована необходимость разработки технологий сбора и обработки лома цветных металлов. Показана возможность использования для этих целей электродинамических сепараторов. Приведены примеры экспериментальных данных, подтверждающих такую возможность.

Ключевые слова: вторичные цветные металлы, сбор и первичная обработка, электродинамические сепараторы

APPLICATION OF EDDY-CURRENT SEPARATORS FOR PRE-METALLURGICAL PREPARATION OF SCRAP AND NON-FERROUS METALS WASTE

S. I. Astapchik¹, E. O. Lapteva², A. Yu. Konyaev³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ semen_rus_99@mail.ru

Abstract. The paper substantiates the need to develop technologies for the collection and processing of non-ferrous scrap. The possibility of using eddy-current separators for these purposes is shown. Examples of experimental data that confirm this possibility are given.

Keywords: secondary non-ferrous metals, collection and primary processing, eddy-current separators

Одним из направлений развития экономики нашей страны, связанных с энерго- и ресурсосбережением, является увеличение производства вторичных цветных металлов. Производство первичных цветных металлов относится к одним из самых энергоемких, а технологические процессы в цветной металлургии характеризуются большим количеством выбросов загрязняющих веществ в биосферу. Использование вторичного сырья уменьшает потребность в минеральном сырье, снижаются энергопотребление и выбросы загрязняющих веществ [1]. Доля вторичных цветных металлов (алюминий, медь) в ведущих промышленных странах достигает 40 %. В России доля вторичных цветных металлов существенно меньше. Это связано с отсутствием технологий и оборудования для сбора и дометаллургической подготовки лома и отходов цветных металлов [2].

Одна из проблем состоит в том, что значительная часть лома цветных металлов содержится в смешанных твердых отходах. При захоронении таких отходов металлы безвозвратно теряются. На большинстве существующих производств по сортировке твердых отходов в России применяется малоэффективный ручной труд. Например, извлечение цветных металлов из твердых коммунальных отходов не превышает 30 % [3]. Из-за малого количества шредерных установок и сортировочного оборудования возникают проблемы с утилизацией автолома, в котором постоянно увеличивается доля цветных металлов, прежде всего алюминия [4; 5]. Одной из быстро растущих групп отходов, содержащих цветные металлы, является лом электротехнического и электронного оборудования, кабельный лом, переработка которых также отстает от потребностей [6].

Другая проблема заключается в том, что лом цветных металлов поступает на металлургические заводы в неразделанном и несортированном виде. Непосредственная плавка такого лома сопровождается потерей легирующих добавок, в первую очередь легкоплавких, выпуском низкокачественных сплавов, повышением энергозатрат, связанным с увеличением времени плавки и расходами на последующую очистку расплавов. Для устранения таких недостатков требуется разработка технологий и оборудования для сортировки металлолома при подготовке его к металлургическому переделу. Задачи сортировки цветных металлов возникают также при переработке электронного и кабельного лома.

В зарубежной практике технологии сбора лома цветных металлов и его дометаллургической подготовки разрабатываются, начиная с 1970–1980-х гг. Широкое применение при сборе и первичной обработке лома и отходов цветных металлов находит электродинамическая сепарация [4]. Таким образом, разработка отечественного оборудования для сбора и обработки вторичных цветных металлов является актуальной задачей.

Разработка и исследование электродинамических сепараторов выполняются на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета (УрФУ). В университете разработаны методики расчета характеристик сепараторов, а в научной лаборатории кафедры имеются установки, позволяющие исследовать параметры сепараторов и выполнять испытания технологий сепарации в интересах различных заказчиков.

Экспериментальные исследования опытных установок показывают, что с их помощью можно выделять включения цветных металлов из потока неметаллов, а также сортировать металлы по видам и группам сплавов. В частности, подтверждена возможность сортировки сплавов цветных металлов, содержащихся в автомобильном ломе. При испытаниях использованы частицы сплавов алюминия (АД31) и цинка (ЦАМ4–1) крупностью от 20 до 40 мм. Измерялись отклонения этих частиц от линии подачи (B) под действием электромагнитных сил. Для снижения влияния на сепарацию случайных факторов опыты выполнялись многократно, а результаты обрабатывались с использованием методов математической статистики. В ходе опытов варьируемым параметром выбиралось расстояние от точки подачи до входного края линейного индуктора L_0 . Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 1. Можно видеть, что с изменением размеров частиц одного и того же сплава наблюдается разброс отклонений частиц (кривые для крупности 20 мм показаны пунктиром, а для крупности 40 мм сплошными линиями). В то же время области, соответствующие сплавам АД31 и ЦАМ4–1, не пересекаются. Это означает, что можно получить селективные концентраты таких сплавов. Например, при подаче частиц металла с расстояния $L_0 = 0,1$ м можно поставить на выходе сепаратора разделитель потока на расстоянии $R = 0,1$ м от линии подачи и собирать частицы разных сплавов в разные приемники.

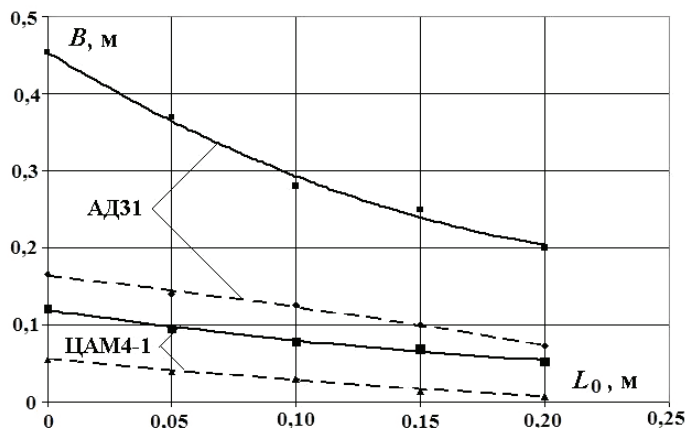


Рис. 1. Области отклонения от линии подачи частиц разных сплавов в сепараторе

В заключение отметим, что проводимые в УрФУ исследования установок электродинамической сепарации и достигнутые результаты создают хорошие предпосылки для успешного развития рассматриваемых ресурсосберегающих технологий.

Список источников

1. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А. И. Татаркин [и др.] // Экология и пром-сть России. 2013. № 5. С. 4–10.
2. Макаров Г. С. Современные проблемы и перспективы рециклинга алюминия в России // Металлургия машиностроения. 2019. № 2. С. 28–33.
3. Ильиных Г. В., Устьянцев В. А., Вайсман Я. И. Построение материального баланса линии ручной сортировки твердых бытовых отходов // Экология и пром-сть России. 2012. № 1. С. 22–25.
4. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems / S. Sakai [et al.] // J. of Material Cycles and Waste Management. February 2014. Vol. 16, Iss. 1. P. 2–20.
5. Митрохин Н. Н., Павлов А. П. Утилизация и рециклинг автомобилей. М. : МАДИ, 2015. 120 с.
6. Модернизация электродинамических сепараторов для переработки кабельного лома / А. Ю. Коняев [и др.] // Цветные металлы. 2020. № 1. С. 7–13.

УДК 666.762

ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЙ ШАМОТ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

А. А. Гетман¹, Г. С. Гиренко², Е. П. Фарафонтова³, И. А. Павлова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

⁴ i.a.pavlova@urfu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки составов масс и технологии получения высокоглиноземистого шамота с содержанием Al_2O_3 65–85 % на основе техногенного сырья — тонкодисперсной корундовой пыли, образующейся при помоле плавленного корунда. Тонкодисперсный корундовый порошок содержит 93–95 % Al_2O_3 , является побочным продуктом и может быть востребован для получения высокоглиноземистого шамота. Фазовый состав полученного шамота с содержанием Al_2O_3 : 65 % — корунд (35–38 %), муллит (46–50 %), тиалит (до 4 %), кристобалит (6–8 %); 75 % — корунд (43–50 %), муллит (45–47 %), тиалит (до 4 %); 85 % — корунд (68–71 %), муллит (24–27 %).

Ключевые слова: высокоглиноземистый шамот, высокоглиноземистый заполнитель, корундовая пыль, высокоглиноземистые огнеупоры

HIGH-ALUMINA CHAMOTTE BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS

A. A. Getman¹, G. S. Girenko², E. P. Farafontova³, I. A. Pavlova⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

⁴ i.a.pavlova@urfu.ru

Abstract. The paper presents both the results of the mass composition development and the technology to produce the high-alumina chamotte with an Al_2O_3 content of 65–85 % based on technogenic raw materials — fine corundum dust formed during grinding of fused corundum. Finely dispersed corundum powder contains 93–95 % Al_2O_3 , which is a by-product and can be used to produce high-alumina chamotte. The phase composition of chamotte with Al_2O_3 content is as follows:

65 % — corundum (35–38 %), mullite (46–50 %), thialite (up to 4 %), cristobalite (6–8 %); 75 % corundum (43–50 %), mullite (45–47 %), thialite (up to 4 %); 85 % — corundum (68–71 %), mullite (24–27 %).

Keywords: high-alumina chamotte, high-alumina filler, alumina dust, high-alumina refractories

При дроблении плавленного электрокорунда образуется пыль, которая улавливается электрофильтрами и складывается на территории предприятия. Этот побочный продукт представляет собой некондиционный материал для производства корундовых огнеупоров, т. к. в нем недостаточное содержание Al_2O_3 (93–97 %). Такой тонкодисперсный корундовый порошок может быть использован в качестве глиноземистого компонента в производстве высокоглиноземистого заполнителя [1–3].

Для решения проблемы получения высокоглиноземистого материала в таком проекте рассмотрено введение тонкодисперсной корундовой пыли в процессе обогащения каолинов без совместного помола сырьевых компонентов. Таким образом, модернизация действующего производства шамота будет заключаться в установке теплового агрегата, обеспечивающего температуру обжига шамота 1700 °С.

В качестве сырьевых материалов использовали обогащенный каолин и тонкодисперсную корундовую пыль. Химический состав сырьевых материалов представлен в табл. 1. Минеральный состав каолина имеет следующий вид (мас. %): мусковит — до 5, кварц — до 2, каолинит — 95–98. Содержание Al_2O_3 в корундовой пыли составляет 93–95 мас. %. Содержание корунда по данным рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) составляет 90 %. В качестве примесей в незначительном количестве присутствуют тилит 1,2 и рутил 0,16 %.

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов

Материал	Содержание, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	$\Delta m_{\text{прк}}$
Глина	42,89– 43,75	39,68– 41,36	0,25– 0,86	0,89– 1,25	0,06– 0,16	0,03– 0,16	0,35– 0,87	13,05– 13,59
Корундо- вая пыль	0,05– 0,30	93,0– 95,0	2,20– 5,00	0,13– 0,50	0,20– 0,24	0,44– 0,62	0,30– 0,55	—

Основными фракциями порошка являются частицы размером 0,16–0,063 мм порядка 50 мас. %, и менее 0,063 мм — 40 мас. %. Содержание частиц более 0,16 мм составляет до 10 %.

Состав шихты для получения высокоглиноземистого шамота был рассчитан из содержания Al_2O_3 в шамоте 65, 75 и 85 мас. %. Пластичные коржи каолина с влажностью 20–25 %, полученные после фильтпресса, тщательно перемешивали с корундовой пылью. Пластичную массу подвергали сушке при 105 °С, измельчали до размера зерен менее 3 мм. Из полученного порошка сформовали брикеты. Обжиг проводили при температуре 1700 °С. Физико-химические свойства образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические свойства образцов
высокоглиноземистого шамота после обжига

Содержание Al_2O_3 , мас. %	Открытая пористость, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Полная усадка, %	Предел прочности при сжатии, МПа
65	27,9	12,0	2,32	4,7	17,8
75	34,0	14,9	2,26	1,0	10,7
85	32,1	12,8	2,52	1,0	11,3

Максимальной усадкой характеризуются образцы, содержащие наибольшее количество каолина в составе массы — 65 % Al_2O_3 . Для этих же образцов характерна наибольшая прочность. Водопоглощение брикета с содержанием 65 % Al_2O_3 составило 11–13 %; 75 % — 14–16 %; 85 % — 12–13 %.

Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Фазовый состав шамота

Содержание Al_2O_3 , мас. %	Корунд	Муллит	Кристобалит	Рутил	Тиалит
65	36	48	7	0,3	1
75	46	46	—	0,5	2
85	69	25	—	0,9	4

Рутил и тиалит являются примесными фазами, внесенными корундовым порошком. Анализируя данные фазового состава полученных образцов высокоглиноземистого шамота (табл. 3), можно сделать вывод, что в составах массы с содержанием Al_2O_3 65 % не весь кристобалит провзаимодействовал с корундом. В шамоте с большим содержанием Al_2O_3 кристобалит не обнаружен. Основными фазами в таком брикете являются муллит и корунд.

В результате проведенных исследований получены образцы высокоглиноземистого заполнителя с содержанием Al_2O_3 65, 75 и 85 % на основе тонкодисперсной корундовой пыли, образующейся при помоле плавленного корунда. Водопоглощение шамота составляет 11–16 %. Кажущаяся плотность высокоглиноземистого шамота с содержанием Al_2O_3 составила 2,32 г/см³; с 75 % — 2,26 г/см³; с 85 % — 2,52 г/см³. В соответствии с ГОСТ 23037–78 алюмосиликатные заполнители марки ЗМЛ и ЗМК должны иметь водопоглощение не более 3 %. На настоящем этапе не получен высокоплотный заполнитель марки ЗМЛ и ЗМК в соответствии с ГОСТ 23037–78. Продолжение исследования направлено на снижение водопоглощения, например путем использования совместного помола каолина и корунда, либо на замену каолина на огнеупорную глину. Технологическая цепочка производства высокоглиноземистого шамота должна включать совместный тонкий помол корундовой пыли с пластичным компонентом, либо отдельный домол корундовой пыли до полного прохода через сетку 0,063 мм с последующим смешением с пластичным компонентом.

Список источников

1. Karklit A. K., Katorgin G. M. High-alumina raw materials in Russia // *Refractories*. 1995. Vol. 36. P. 122–126.
2. Properties of ceramics based on Al_2O_3 with admixture of untradispersed powder of Al_2O_3 synthesized by the electrochemical method / Yu. V. Komolikhov [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 60. P. 350–354.
3. High-alumina technogenic raw material / V. A. Perepelitsyn [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011. Vol. 52. P. 84–94.

УДК 666.3-127.7

ТЕРМОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Г. С. Гиренко¹, С. М. Яговитина², И. А. Павлова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ i.a.pavlova@urfu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки технологии производства керамических инфракрасных нагревателей, предназначенных для равномерного глубокого прогрева поверхностей при длительных термических обработках. При разработке технологии производства инфракрасных нагревателей отработаны способы их получения различными методами формования. Получен термостойкий материал с низким ТКЛР до $3,12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ключевые слова: кордиерит, индиалит, тальк, глина, глинозем, термостойкость, пластическое формование, шликерное литье, полусухое формование

HEAT-RESISTANT CERAMIC INFRARED HEATERS BASED ON RAW MATERIALS OF THE URAL REGION

G. S. Girenko¹, S. M. Yagovitina², I. A. Pavlova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ i.a.pavlova@urfu.ru

Abstract. The paper presents the results of the development of a technology to produce ceramic infrared heaters intended for uniform deep surface heating during long-sustained heat treatment. When developing a technology to produce infrared heaters, methods for their production by various molding methods have been worked out. A heat-resistant material with a low TCLE up to $3.12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ was obtained.

Keywords: cordierite, indialite, talc, clay, alumina, heat resistance, plastic forming, slip forming, semidry forming

Материалом для изготовления инфракрасных нагревателей является кордиеритовая керамика. Использование инфракрасных керамических нагревателей снижает энергозатраты на прогрев окружающего пространства, длительно сохраняет набранную температуру. Инфракрасные нагреватели применяют в металлургии, машиностроении, химической и пищевой промышленности в качестве сот для газовых обогревателей и грилей, а также в качестве элементов печей, тандыров, обогревателей помещений, теплиц и др. Инфракрасные лучи создают комфортные и оптимальные температуры, выполняют нагрев, не пересушивая воздух. Некоторые модели инфракрасных излучателей из керамики устанавливают в парилки, которые называются инфракрасными саунами.

Одним из наиболее важных эксплуатационных свойств кордиеритовой керамики является высокая термостойкость. Термическая стойкость кордиеритовой керамики связана с низким термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) $(1-0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Шамотные огнеупоры [1], отличающиеся также высокой термостойкостью, уступают кордиеритовой керамике в связи с более высоким ТКЛР $((4,5-6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$. Одним из недостатков технологии производства кордиеритовой керамики является узкий интервал спекания и не слишком большая прочность [2].

Для производства кордиеритовой керамики используют чистые оксиды или соли в стехиометрических соотношениях. Недостатками таких составов являются узкий интервал спекания, невысокая прочность получаемых изделий, а главное, высокая стоимость применяемых в качестве сырья материалов. Наиболее перспективен синтез кордиерита из природных материалов, таких как каолин, глина, тальк и др., позволяющий снизить стоимость и сделать кордиеритовую керамику более доступной [3–5].

Цель проекта — получение термостойкого керамического материала на основе сырья уральского региона различными способами формования. В качестве сырьевых материалов использовали огнеупорную глину, тальк и глинозем уральского региона. Химический состав материалов, использованных в работе, представлен в табл. 1.

Формование образцов предложено выполнять полусухим прессованием, пластическим способом и шликерным литьем. Для полусухого способа формования сырьевые материалы в рассчитанном соотношении подвергали мокрому тонкому помолу в течение 9 ч.

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов

Материал	Содержание, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	$\Delta m_{\text{прк}}$
Глина	49,82– 55,34	28,78– 31,04	1,33– 1,90	2,40– 4,27	0,26– 0,37	0,54– 1,05	0,10– 0,19	0,65– 0,89	11,11– 13,15
Тальк	55,39– 62,60	0,38– 3,20	0– 0,01	2,52– 2,63	0,14– 0,17	26,62– 33,20	0,01– 1,34	0– 0,01	8,00– 11,02
Корунд	0– 0,599	98,00– 98,30	0– 0,14	0,408– 0,507	0– 3,23	0,322– 0,585	0,321– 0,371	0– 0,599	–

Полученный шликер сливали и подвергали сушке. Образовавшиеся после сушки коржи подвергали дроблению в ступке до размера зерен менее 3 мм. Из полученного порошка формовали образцы и подвергали их обжигу. Для пластического способа формования полусухой порошок, полученный так же, как и при полусухом способе, увлажняли водой до пластичного состояния и формовали образцы. Формование изделий шликерным литьем выполняли из шликера пониженной влажности с применением электролитов. Литье образцов производили в гипсовые формы сливным способом. Полученные образцы обжигали при температуре 1320 °С. Свойства полученных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства обожженных образцов

Способ формования	Кажущаяся плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Открытая пористость, %	Полная усадка, %
Полусухой	1,82	16,2	29,5	0,98
Пластический	1,92	11,7	22,5	1,80
Шликерное литье	1,68	21,2	35,7	2,63

Минимальной плотностью 1,68 г/см³ обладают образцы, изготовленные шликерным литьем. Минимальная усадка до 1 % получена при формовании образцов полусухим способом. При шликером способе формования усадка составляет 2,63 %.

У обожженных образцов определили ТКЛР в различных интервалах температур (табл. 3).

Таблица 3

Температурный коэффициент линейного расширения образцов

Интервал температур, °С	20–200	20–400	20–600	20–800
ТКЛР, К ⁻¹	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$1,65 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$

В результате проведенных исследований определены свойства сырьевых материалов для производства кордиеритовых инфракрасных нагревателей на основе сырьевых материалов Уральского региона. Рассчитаны составы масс и определены параметры формования различными способами: полусухим прессованием, пластическим формованием, шликерным литьем. Определены параметры обжига и свойства образцов после обжига. Получен термостойкий материал с низким ТКЛР до $3,12 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹.

Список источников

1. Черепанов А. М., Тресвятский Г. С. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. М. : Металлургия, 1964. 400 с.
2. Тонкая техническая керамика / под ред. Х. Янагида ; пер. с яп. В. Я. Серебрякова, А. Н. Сеницыной ; под ред. А. К. Карклита. М. : Металлургия, 1986. 278 с.
3. Синтез кордиерита из природных материалов в присутствии Al₂O₃-содержащих компонентов / Л. Д. Зобина [и др.] // Огнеупоры. 1987. № 2. С. 24–26.
4. Современное состояние разработок в области радиопрозрачных кордиеритовых ситаллов / А. С. Чайникова [и др.] // Авиац. материалы и технологии. 2014. № 6. С. 45–51.
5. Кривошапкина Е. Ф., Кривошапкин П. В., Дудкин Б. Н. Микропористая керамика кордиеритового состава на основе природного сырья // Изв. Коми науч. центра УрО РАН. 2011. Вып. 3(7). С. 27–32.

УДК 66-9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТЕПЛООБМЕННОЙ ТРУБКИ ВЫПАРНОГО АППАРАТА ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

**В. Н. Гушшамова¹, А. П. Хомяков², С. В. Морданов³,
Т. В. Хомякова⁴, С. С. Пецура⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ 89126634949@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследования потерь давления за счет трения по длине теплообменной трубки в трубном пространстве пленочного выпарного аппарата. Приведено соотношение потерь давления за счет трения пленки раствора о поверхность трубки и за счет трения пара о поверхность пленки раствора. Установлено, что лимитирующим параметром потерь давления в теплообменной трубке за счет трения является трение вторичного пара о поверхность пленки раствора.

Ключевые слова: выпарной аппарат пленочного типа, гидравлическое сопротивление, потери давления за счет трения

INVESTIGATION OF PRESSURE LOSSES DUE TO FRICTION ALONG THE HEAT EXCHANGE LENGTH OF FALLING-FILM EVAPORATOR TUBE

**V. N. Gushshamova¹, A. P. Khomyakov², S. V. Mordanov³,
T. V. Khomyakova⁴, S. S. Petsura⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ 89126634949@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of pressure losses due to friction along the length of the heat exchange tube in the tube space of the falling-film evaporator. The ratio of pressure losses due to the friction of the solution film on the surface of the tube and due to the friction of steam on the surface of the solu-

tion film is given. It is established that the limiting parameter of pressure loss in the heat exchange tube due to friction is the friction of the secondary steam on the surface of the solution film.

Keywords: falling-film evaporator, hydraulic resistance, friction pressure drops

Пленочные выпарные аппараты находят широкое применение в промышленности. Такие аппараты применяются для концентрирования растворов, в т. ч. чувствительных к высоким температурам. Аппараты характеризуются большей эффективностью теплообмена, а также малым временем пребывания раствора в греющей камере выпарного аппарата в отличие от других типов аппаратов.

Результаты исследований гидродинамики пленки орошающей жидкости представлены в значительном количестве работ [1–4]. Теоретическое описание теплоотдачи к пленке орошающей жидкости при ее нагревании или охлаждении в турбулентной области течения затруднительно, что объясняется сложностью этого течения, которое в этом случае сопровождается трехмерными хаотическими волнами на поверхности пленки. По этой причине большинство работ опираются на экспериментальные исследования [5–7].

Целью настоящей работы является исследование изменения давления по длине теплообменной трубки выпарного аппарата пленочного типа.

Исследования проведены методом математического численного моделирования для выпарного аппарата с падающей пленкой, оснащенного одной теплообменной трубкой (диаметр $\varnothing 38 \times 2$ мм, длина $L = 7$ м). Данные получали по длине теплообменной трубки с шагом $\Delta L = 0,1$ м.

Основные технологические параметры работы аппарата:

- 1) объемный расход исходного раствора — 100 л/ч;
- 2) полезная разность температур — 20°C ;
- 3) температура исходного раствора — 70°C ;
- 4) температура кипения раствора — 70°C ;
- 5) коэффициент теплопередачи принимали постоянным по всей длине теплообменной трубки, равным $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

На рис. 1 показаны общие потери давления за счет трения, потери давления за счет трения пара о поверхность пленки и потери давления за счет трения пленки о стенку трубки.

Получена зависимость изменения общих потерь давления за счет трения по длине теплообменной трубки:

$$\Delta p = 2,83L^2 + 0,22L + 12,48,$$

где Δp — потери давления в трубном пространстве, Па; L — длина теплообменной трубки, м.

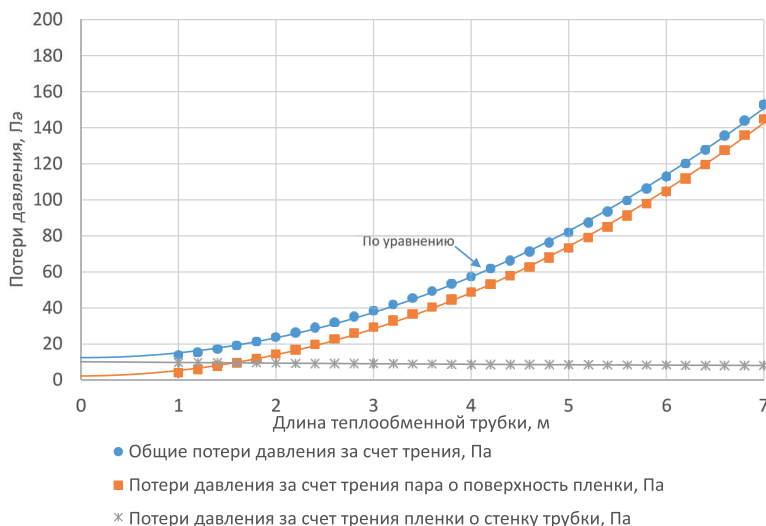


Рис. 1. Потери давления по длине теплообменной трубки

Анализ результатов исследования показал следующее. Общие потери давления по длине теплообменной трубки изменяются от 13,86 до 152,99 Па. Потери давления за счет трения пара о поверхность пленки изменяются от 4,1 до 144,88 Па. Потери давления за счет трения пленки раствора о стенку трубки изменяются по длине теплообменной трубки практически линейно в диапазоне от 9,75 до 8,1 Па.

Установлено, что потеря давления за счет трения пара о поверхность пленки является лимитирующим параметром общих потерь давления за счет трения.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для определения оптимальной длины теплообменной трубки выпарного аппарата пленочного типа и снижения металлоемкости оборудования.

Список источников

1. Mass transfer characteristics of the high temperature falling film evaporation over a vertical wall under countercurrent laminar airflow / C. Li [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. Vol. 82. P. 269–275.

2. Aursand E., Ytrehus T. Comparison of kinetic theory evaporation models for liquid thin-films // International Journal of Multiphase Flow. 2019. Vol. 116. P. 67–79.

3. Review on liquid film flow and heat transfer characteristics outside horizontal tube falling film evaporator: CFD numerical simulation / Q. Wang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 163. 120440.

4. Modeling and simulation of an industrial falling film evaporator for alumina production / X. Wang [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. 2020. Vol. 154. P. 303–315.

5. Левераш В. И. Экспериментальные исследования теплоотдачи к пленке кипящей жидкости, свободно стекающей по вертикальной поверхности // Теплоэнергетика. 1969. № 3. С. 86–88.

6. Марценюк А. С., Стабников В. Н. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности. М. : Лег. и пищевая пром-сть, 1981. 160 с.

7. Лазарев В. Д. Экспериментальное определение толщины и скорости стекающей пленки при сгущении молока с сахаром // Молочная пром-сть. 1968. № 6. С. 20–22.

УДК 622.276

УДАЛЕНИЕ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

К. Р. Кожевникова¹, М. Ф. Костерина², Ю. И. Нейн³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ y.i.nein@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрен подбор растворителей для эффективного удаления асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) из трубопровода. Рассчитаны показатели эффективности растворителей и получено, что наилучшей эффективностью удаления АСПО обладает состав этилцеллозольва с добавлением эмульгатора Ялан-Э2.

Ключевые слова: ресурсосбережение, эффективность растворителя, АСПО, растворитель, очистка трубопроводов

REMOVAL OF ASPHALTENE-RESIN-PARAFFIN DEPOSITS

K. R. Kozhevnikova¹, M. F. Kosterina², Yu. I. Nein³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ y.i.nein@urfu.ru

Abstract. The work considers the selection of solvents for the effective removal of ARPD from the pipeline. The indicators of the efficiency of solvents were calculated and it was found that the composition of ethylcellosolve with the addition of the emulsifier Yalan-E2 possesses the best removal efficiency of ARPO.

Keywords: resource saving, solvent efficiency, ARPD, solvent, pipeline cleaning

Развитие нефтяной промышленности России на современном этапе характеризуется снижением качества сырьевой базы. Так, при добыче парафинистой нефти серьезной проблемой, вызывающей осложнения в работе скважин, нефтепромыслового оборудования и трубопроводных коммуникаций, является образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [1].

АСПО — природный композитный материал, состоящий из органо-минеральных веществ и соединений. Отложения представляют собой, как правило, мазеподобную суспензию или эмульсию с высокой адгезией к различным поверхностям [2]. АСПО снижают производительность, увеличивают износ оборудования, расходы электроэнергии и давление в выкидных линиях. По этой причине борьба с АСПО — актуальная задача при интенсификации добычи и транспортировки нефти и газа [1].

Существует два основных метода удаления АСПО — механический и химический.

Механический метод основывается на использовании различного типа скребков, чаще скребков-центраторов. Скребок многократно отправляется через трубопровод для очистки от отложений. Однако при таком методе трудно выявить качество очистки трубопровода. К недостаткам можно отнести застревание скребка в запарафиненных трубопроводах и отказы механических устройств [2].

Одним из перспективных и выгодных способов борьбы с запарафиниванием скважин и трубопроводов является химический метод, т. к. он имеет высокую эффективность, технология проведения работ несложна, эффект действия реагентов имеет пролонгированный характер [1].

В настоящее время поиск удалителей и растворителей АСПО, как правило, проводится опытным путем. Многие предложенные составы подбирают лишь с учетом наличия сырья в нефтедобывающем регионе, причем выявляется общий эффект взаимодействия АСПО-удалителя, без определенного механизма его действия [1].

Наиболее распространенным химическим методом удаления АСПО является применение органических растворителей.

Целью настоящей работы было подобрать эффективный растворитель для удаления АСПО в трубопроводе. Рассматривались различные органические растворители, а также их композиции с эмульгаторами Ялан-Э2 и ОП-7 и комплексным реагентом ПолиПАВ. Исследования проводились по лабораторной методике определения эффективности реагентов для удаления асфальтосмолопарафиновых отложений [3], основанной на определении эффективности растворителя путем изменения массы образца АСПО, взятого на анализ до и после эксперимента с применением специальных ситечек-корзинок (рис. 1).



Рис. 1. Корзинки с остатками образца АСПО после растворения и фильтр с осадком после фильтрования

По результатам опытов были рассчитаны следующие показатели эффективности растворителей: моющая способность растворителя (\mathcal{E}_m), диспергирующая способность растворителя (\mathcal{E}_d), растворяющая способность растворителя (\mathcal{E}_p) [3]. Полученные данные представлены в таблице.

Таблица

Показатели эффективности растворителей
с использованием эмульгаторов

Растворитель	Показатели		
	$\mathcal{E}_m, \%$	$\mathcal{E}_d, \%$	$\mathcal{E}_p, \%$
Растворитель-646 + Ялан-Э2	83,690	68,310	15,370
Дизельное топливо 44 % + толуол 52 % + Ялан-Э2	24,398	19,903	4,495
Этилцеллозольв + вода + ОП-7 (4 : 1)	4,400	3,080	1,320
Бутанол-1 + вода + ОП-7 (4 : 1)	44,439	36,505	7,935
Этилцеллозольв + вода + Полипав (4 : 1)	2,260	1,120	1,130
Бутанол + вода + Полипав (4 : 1)	36,862	23,481	13,381
Этилцеллозольв + Ялан-Э2	87,310	68,980	18,320

Для наглядного сравнения показателей построена диаграмма (рис. 2).

Согласно полученным результатам наилучшей эффективностью удаления АСПО обладает состав этилцеллозоля с добавлением эмульгатора Ялан-Э2 (3 % от объема растворителя). Следовательно, такой состав растворителя является эффективным для промывки трубопровода в динамических условиях.

Было проведено сравнение составов по стоимости и по классам опасности веществ, которое показало, что более дешевыми и безо-

пасными являются растворитель-646 и этилцеллозольв с добавлением эмульгатора Ялан-Э2.

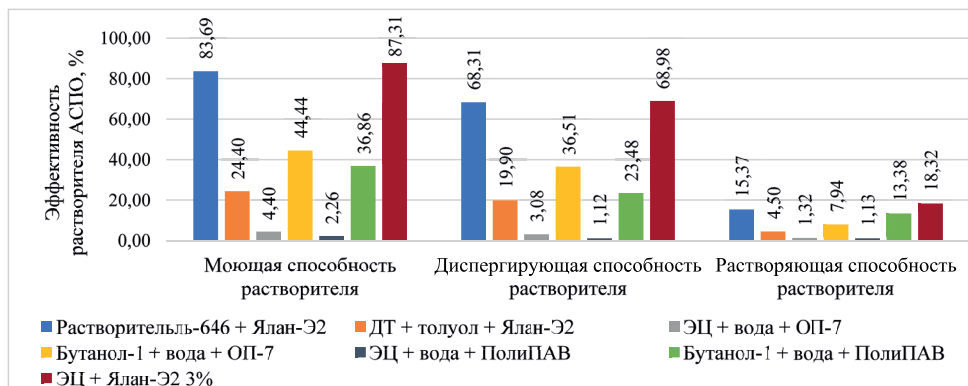


Рис. 2. Эффективность растворителей и композиций растворителей с эмульгаторами и ПолиПАВ

Таким образом, состав этилцеллозольва с добавлением эмульгатора Ялан-Э2 для удаления АСПО из нефтепровода имеет наибольший ресурсосберегающий и экономический эффект.

Список источников

1. Иванова Л. В., Буров Е. А., Кошелев В. Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 268–284.
2. Van der Werff A. The Importance of Pipeline Cleaning: Risks, Gains, Benefits, Peace of Mind [Electronic resource] // Pipeline Technology Conference: Proceedings. Germany, Hannover, 25 Apr. 2006. P. 224. URL: <https://www.pipeline-conference.com/abstracts/importance-pipeline-cleaning-risks-gains-benefits-peace-mind> (date of access: 06.12.2020).
3. Хайбуллина К. Ш. Обоснование комплексной технологии удаления и предупреждения органических отложений в скважинах на поздней стадии разработки нефтяного месторождения : дис. ... канд. тех. наук : 25.00.17. Санкт-Петербург, 2018. 98 с.

УДК 66.048

СТРУКТУРА ПОТРЕБНОСТЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ В ВЫПАРНЫХ УСТАНОВКАХ

Е. И. Липина¹, В. А. Никулин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² v.a.nikulin@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрены потребности предприятий России в выпарном оборудовании для переработки их сточных вод. Представлены результаты анализа данных о производственных стоках предприятий в виде диаграмм, цель которого — сформировать основание для оценки того, будут ли технологии предприятий и используемые в них выпарные установки востребованы и эффективны с точки зрения экологической безопасности производства.

Ключевые слова: выпарные установки, производственные сточные воды, очистка производственных стоков, термическое обессоливание

STRUCTURE OF RUSSIAN ENTERPRISES' NEEDS IN EVAPORATION INSTALLATIONS

E. I. Lipina¹, V. A. Nikulin²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² v.a.nikulin@urfu.ru

Abstract. Russian enterprises' needs in evaporation equipment for recycling their wastewater were analyzed in the paper. Results of analysis of data about industrial wastewater of enterprises are presented on diagrams, the purpose of which is to form the basis for assessing whether companies' technology and evaporators used in it of claimed and effective from the point of view of environmental safety.

Keywords: evaporation installations, industrial wastewater, purification of industrial effluents, thermal desalination

Как показывает анализ работы очистных сооружений промышленных предприятий [1], на большинстве из них используются реагентные методы, которые в лучшем случае позволяют очистить сточные воды от тяжелых металлов и нейтрализовать частично обезвреженные стоки. Все легкорастворимые соли (хлориды, сульфаты, фториды, нитраты, карбонаты, аммиак, фосфаты) остаются в сточных водах. Это делает невозможным повторное использование таких вод в основной технологии предприятий. Как отмечено в работе И. А. Кутузовой и Г. Б. Кожемякина [2], использование выпарных установок позволяет решить проблему эффективной очистки сточных вод от легкорастворимых примесей с получением обессоленной воды требуемого качества и влажного осадка солей. Были проанализированы заявки на проектирование выпарных установок (опросные листы, технические задания, запросы), поступившие на одно из российских научно-производственных предприятий в период с 1 января 2009 г. по 1 января 2020 г.

Анализ заявок показал, что переработка стоков выпариванием требуется предприятиям широкого круга отраслей промышленности, что отражено на диаграмме, представленной на рис. 1.

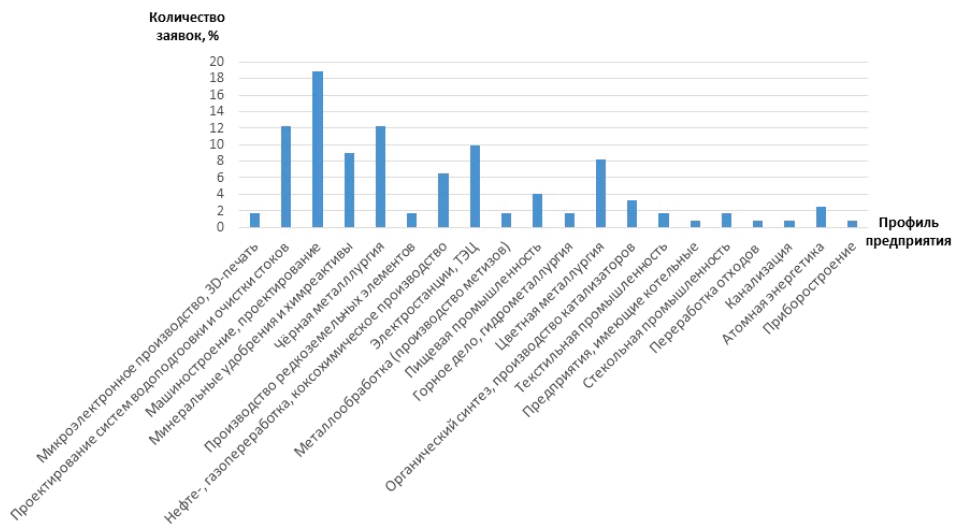


Рис. 1. Структура потребностей предприятий в выпарном оборудовании в зависимости от профиля деятельности предприятия

Как видно из рисунка, это химическая и нефтехимическая, машиностроительная, стекольная, пищевая промышленность, металлур-

гия и металлообработка, энергетика, а также предприятия непроизводственного профиля; в большей степени передел выпарки требуется производителям энергии — электростанциям, теплоэлектроцентралям предприятиям черной металлургии и машиностроения. На рис. 2 приведена структура зависимости количества поступивших заявок от вида стока, подлежащего переработке на этих предприятиях.

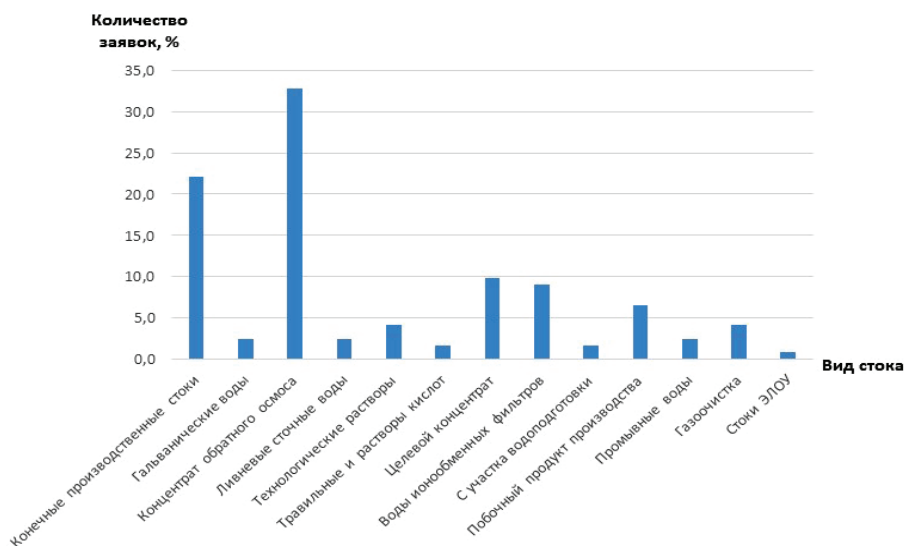


Рис. 2. Структура потребностей предприятий в выпарном оборудовании в зависимости от происхождения сточных вод

В соответствии со структурой, приведенной на рис. 3, наибольшее число заявок — 40 % — поступило на установки с малой производительностью по сырью — от 2 до 5 м³/ч.

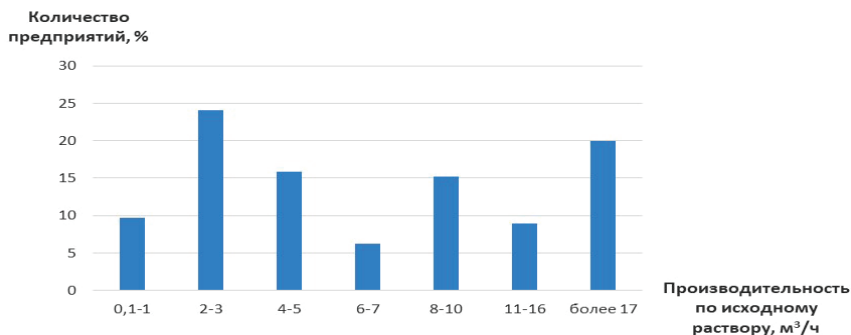


Рис. 3. Структура потребностей предприятий в выпарном оборудовании в зависимости от требуемой производительности по исходному раствору

Зависимость востребованности выпарных установок от состава стоков, подлежащих выпариванию приведена на рис. 4.

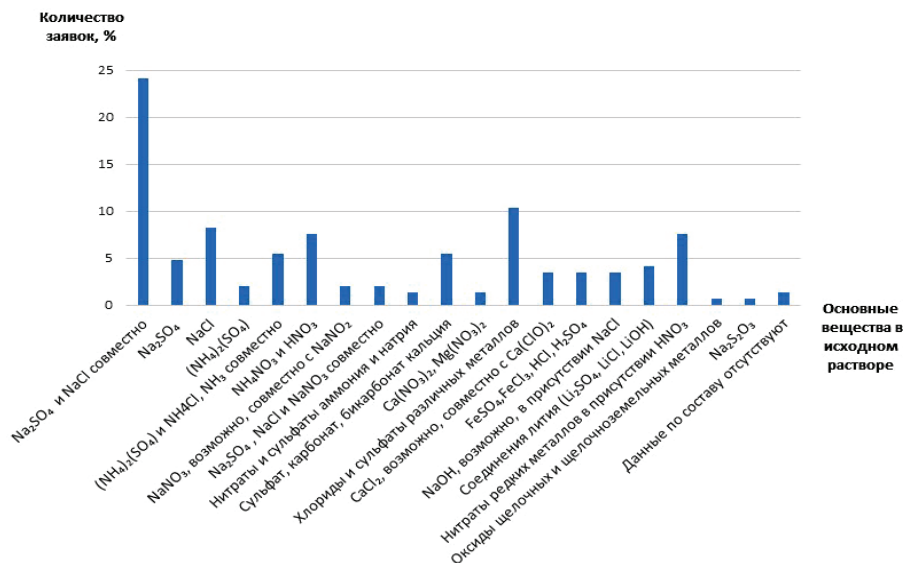


Рис. 4. Структура потребностей предприятий в выпарном оборудовании в зависимости от состава исходного раствора

В подтверждение существующих работ [1], результаты анализа заявок показали, что в сточных водах обычно содержится большое количество разнообразных компонентов, что усложняет аппаратное оформление процессов их выпаривания, а это требует индивидуального подхода к его разработке. В связи с этим, непростой проблемой переработки стоков выпариванием является сложность получения чистых порошкообразных продуктов, что приводит к накоплению не утилизируемых отходов — смесей солей.

Список источников

1. Технологии и оборудование для обработки промышленных сточных вод, обеспечивающие замкнутый водооборот / О. Д. Линников [и др.] // Вода. 2015. № 99. С. 18–22.
2. Кутузова И. А., Кожемякин Г. Б. Анализ и пути решения проблемы обезвреживания высокоминерализованных жидких отходов промышленных предприятий // Вестник ХНАДУ. 2011. № 52. С. 78–79.

УДК 62-9

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ТОПЛИВНОГО И ПУСКОВОГО ГАЗА

Н. Г. Михайлов¹, В. П. Ануфриев²

¹ Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Mikh90@mail.ru

Аннотация. В работе показана возможность ресурсосбережения на подогревателях топливного и пускового газа (ПТПГ), установленных на объектах газотранспортной системы. Выявлены резервы, позволяющие устанавливать теплогенерирующие установки меньшей мощности в целях экономии денежных средств предприятия на этапе закупки оборудования. Предложены энергоэффективные мероприятия для ПТПГ, позволяющие сократить потребление природного газа и уменьшить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Ключевые слова: энергоэффективность, ресурсосбережение, подогреватель топливного и пускового газа (ПТПГ)

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF FUEL AND START GAS HEATERS

N. G. Mikhailov¹, V. P. Anufriev²

¹ Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Mikh90@mail.ru

Abstract. The paper presents the possibility of resource-saving for the fuel and starting gas heater, use of the gas transmission system at the facility. Reserves have been identified that allow the installation of heat-generating installations of lower capacity in order to save the enterprise's money at the stage of purchasing equipment. Energy-efficient measures for a gas preheater are proposed, allowing to reduce

the consumption of natural gas and reduce emissions of pollutant emissions into the atmosphere.

Keywords: energy efficiency, resource saving, fuel and starting gas heater

Оценка теплогенерирующих установок обусловлена необходимостью учета множества факторов, которые следует принимать во внимание как в техническом, так и в эколого-экономическом аспектах, поскольку даже на текущем уровне технологической модернизации существуют ресурсосберегающие мероприятия, позволяющие не только сократить потребления топлива, но и снизить выбросы загрязняющих веществ. Инженеры предприятий постоянно находят новые энергоэффективные методы, дающие возможность экономить денежные средства за счет ресурсосбережения.

Таким образом, при анализе работы подогревателей топливного и пускового газа, установленных на объектах газотранспортной системы, были выявлены эффективные эксплуатационные ресурсосберегающие мероприятия, а также мощностной резерв, позволяющий использовать установки другой модели с меньшей мощностью.

Для решения поставленной задачи были использованы теплофизические параметры, представленные в таблице.

Таблица

Возможные диапазоны теплопроизводительности при различных D_y сопел и рабочем давлении P , кг/см²

D_y , мм	Теплопроизводительность, Гкал/ч						
1,8	0,1360	0,1700	0,2040	0,2380	0,2584	0,2924	0,306
2,0	0,1632	0,1904	0,2448	0,2788	0,3060	0,3264	0,374
2,2	0,1836	0,2448	0,3060	0,3400	0,3740	0,4080	0,442
2,5	0,2176	0,3128	0,3808	0,4420	0,4896	0,5304	0,578
3,0	0,3060	0,4420	0,5304	0,6188	0,6800	0,7480	0,828
P , кг/см ²	0,1000	0,2000	0,3000	0,4000	0,5000	0,6000	0,700

Для расчета рассматривалась ситуация, когда на подогреватель топливного и пускового газа установлены сопла диаметром $D_y = 2,2$ мм, рабочее давление на большом горении — $0,4$ кгс/см² (малое горение — $0,2$ кгс/см²).

Используя формулу — $B = G(C_{\text{вых}} t_{\text{вых}} - C_{\text{вх}} t_{\text{вх}}) / (Q_p^H \cdot 0,01)$ — и оперируя только изменением температуры газа на входе в подогреватель

($G_{\max} = \text{constant}$; $P = \text{constant}$; $t_{\text{вых}} = 40^\circ\text{C}$), получаем следующий результат.

При входной температуре газа свыше $10\text{--}12^\circ\text{C}$ технико-экономически нецелесообразно использовать сопла $D_y = 2,2$ мм, поскольку происходит перерасход топлива. Использование сопел $D_y = 2,2$ мм рассчитывается исходя из возможного включения шести газоперекачивающих агрегатов ГТК-10—4 (номинальный расход газа на один агрегат $G = 3600 \text{ м}^3/\text{ч}$). В работе, как правило, находятся не более 2—3 газоперекачивающих агрегатов, а расход топлива на один агрегат ГТК-10—4 не достигает паспортного номинального расхода, следовательно, существует резерв по минимизации расходуемого топлива только из-за температуры газа на входе в подогреватель.

Учитывая существующий диаметр сопел (см. табл.), установленный на подогревателе топливного и пускового газа, можно сделать следующие выводы:

1) в период повышенных температур наружного воздуха (повышенная температура газа на входе в подогреватель), а также небольшого расхода газа при работе от 1 до 3 газоперекачивающих агрегатов необходимо устанавливать минимальный расчетный диаметр сопел (2; 1,8 мм). Целесообразность применения сопел меньшего диаметра в весенний, летний и осенний период также обуславливается оперативностью их замены в благоприятных погодных условиях;

2) в другие температурные периоды, а также при работе 4—6 газоперекачивающих агрегатов необходимо устанавливать максимально расчетный диаметр сопла;

3) при установке подогревателя топливного и пускового газа на небольшой расход газа и при работе до четырех газоперекачивающих агрегатов существует возможность установки моделей меньшей мощности — ПТПГ-15 М и др.

Расчет технико-экономической эффективности выполнен по следующей формуле:

$$B = G(C_{\text{вых}} t_{\text{вых}} - C_{\text{вх}} t_{\text{вх}}) / (Q_p^H \cdot 0,01).$$

При работе шести газоперекачивающих агрегатов ГТК-10-4 (номинальный расход газа на один агрегат $G = 3600 \text{ м}^3/\text{ч}$):

$$B = (6 \cdot 3600) \cdot (0,421 \cdot 40 - 0,447 \cdot 10) / (8000 \cdot 82 \cdot 0,01) = 40,73 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При работе трех газоперекачивающих агрегатов ГТК-10-4 (при том же номинальном расходе газа на один агрегат):

$$B = (3 \cdot 3600) \cdot (0,421 \cdot 40 - 0,447 \cdot 10) / (8000 \cdot 82 \cdot 0,01) = 20,36 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При работе двух газоперекачивающих агрегатов ГТК-10–4 (при том же номинальном расходе газа на один агрегат):

$$B = (2 \cdot 3600) \cdot (0,421 \cdot 40 - 0,447 \cdot 10) / (8000 \cdot 82 \cdot 0,01) = 13,57 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Таким образом, с помощью изменения диаметра сопел на подогревателях топливного и пускового газа при работе трех газоперекачивающих агрегатов можно сократить потребление природного газа на $\sim 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, а при работе двух агрегатов на $\sim 20 \text{ м}^3/\text{ч}$. В общей сложности, для одного подогревателя снижение выбросов окислов азота составит до 25 т/г. и двуокиси углерода до 105 т/г. Кроме того, при установке менее мощного подогревателя топливного и пускового газа, возможна экономия денежных средств предприятия за счет меньшей стоимости теплогенерирующей установки.

УДК 666.651.2

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

**Л. Ф. Муфтеева¹, Д. Д. Коньков², Ю. Д. Конькова³,
К. Г. Земляной⁴, И. А. Павлова⁵**

^{1,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

^{2,3} Научно-производственное предприятие «Керамические системы»,
Новоуральск, Россия

⁵ i.a.pavlova@urfu.ru

Аннотация. Проект направлен на получение материала из отечественного сырья в целях получения керамического субстрата для каталитических автомобильных нейтрализаторов систем снижения токсичности отработанных газов двигателей внутреннего сгорания. Получены материалы с содержанием кордиерита до 70 %. В работе использовали различные виды глиноземистых материалов одинаковой дисперсности. Установлено, что максимальное содержание кордиерита получено при использовании в качестве глиноземсодержащего компонента корундовых порошков.

Ключевые слова: кордиерит, керамический субстрат, термостойкая керамика

SYNTHESIS OF HIGHLY-POROUS HONEYCOMBED CATALYSTS FOR PURIFICATION OF EXHAUST GAS

**L. F. Mufteeva¹, D. D. Kon'kov², Yu. D. Kon'kova³,
K. G. Zemlyanov⁴, I. A. Pavlova⁵**

^{1,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

^{2,3} Scientific Production Association "Keramicheskie sistemy", Novoural'sk, Russia

⁵ i.a.pavlova@urfu.ru

Abstract. The project is aimed at synthesizing material from domestic raw materials in order to obtain a ceramic substrate for catalytic automobile converters for reducing the toxicity of exhaust gases of internal combustion engines. Materials with a cordierite content up to 70 % were obtained. Various types of alumina materials of the same dispersion were used. It was found that the maximum content of cordierite was obtained when corundum powders were used as an alumina-containing component.

Keywords: cordierite, ceramic substrate, heat-resistant ceramics

Необходимость охраны окружающей среды от загрязнения отработавшими газами автомобилей является одним из важнейшей условий при разработке и использовании автомобильных двигателей. Одним из компонентов автомобильных двигателей, способных обеспечить соответствие требованиям Евро-6, Tier-III, Stage-III являются керамические кордиеритовые субстраты. Проект направлен на получение материала из отечественного сырья и дальнейший синтез кордиерита в целях использования в изготовлении керамического субстрата для каталитических автомобильных нейтрализаторов систем снижения токсичности отработанных газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

В работе исследованы свойства сырьевых материалов для производства кордиеритовой керамики на основе сырьевых ресурсов РФ. В качестве пластичных компонентов использовали огнеупорные глины и каолины, в качестве магнийсодержащих компонентов — тальки [1–6]. Для корректировки химического состава на стехиометрическое содержание и, соответственно, получения максимального количества кордиерита в готовых изделиях в состав масс на основе глины, каолинов, тальков вводили оксид алюминия в виде различных тонкодисперсных порошков: в виде двух видов корундов (табл. 1, индекс 95 и К), в виде гидроксида алюминия (табл. 1, индекс 10 и ТА). В табл. 1 представлено распределение частиц глиноземистых порошков по размеру. Как видно из табл. 1, порошки глинозема с индексом 10, 95, ТА имеют приблизительно одинаковое распределение по всем фракциям. Порошок ТА содержит фракцию более 90 мкм до 1 %. Глинозем с индексом К по сравнению с предыдущими содержит фракции менее 10 мкм, практически в 2 раза меньше, чем предыдущие. Все порошки по результатам химического анализа содержат Al_2O_3 в количестве 99 %.

Химический состав масс представлен в табл. 2.

Таблица 1

Распределение частиц по размерам в глиноземистых порошках

Размер частиц, мкм	Индекс глиноземистого порошка			
	10	95	ТА	К
Более 100	—	—	0,7	0,1
100–90	—	—	0,6	0,3
90–80	0,1	0,1	0,7	0,6
80–70	0,1	0,2	0,8	1,0
70–60	0,2	0,6	1,8	3,5
60–50	0,7	0,5	0,9	2,5
50–40	1,0	1,3	1,0	6,1
40–30	3,8	4,9	4,8	11,3
30–20	13,0	15,1	11,9	17,4
20–10	29,9	30,2	28,4	27,6
10–5	24,1	22,1	24,3	14,9
5–0	26,9	25,1	23,1	14,9

Таблица 2

Химический состав масс, мас. %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
50,14	34,03	0,16	1,19	0,20	13,47	0,00	0,79

Сырьевые компоненты тщательно перемешивали, образцы формовали методом полусухого прессования. Обжиг образцов проводили в интервале температур 1300–1360 °С. Физико-химические свойства образцов после обжига приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-химические свойства образцов кордиеритовой керамики

Индекс массы	Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Усадка, %	Содержание кордиерита, %
10	1,90	22,7	4,8	63
95	1,87	23,0	–0,3	70
ТА	1,89	23,3	4,6	50
К	1,80	29,6	0,7	68

В табл. 4 приведены результаты определения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) образцов в различных интервалах температур.

Таблица 4

ТКЛР образцов в различных интервалах температур ($\alpha \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

Индекс массы	(20–700) °C	(20–800) °C	(20–1000) °C
10	2,01	2,16	2,42
95	1,90	2,09	2,35
ТА	2,20	2,45	2,73
К	1,95	2,10	2,40

По результатам работы установлено, что максимальное содержание кордиерита получено в образцах с использованием в качестве глиноземсодержащих компонентов корундовых порошков в массах с индексами 95 и К, 70 и 68 %, соответственно. Также установлено, что чем большее содержание кордиерита в образцах, тем меньше усадка образцов. У образцов с индексом 95 наблюдается даже увеличение образцов на 0,3 %. ТКЛР образцов зависит от содержания кордиерита: чем больше кордиерита, тем меньше ТКЛР.

Список источников

1. Structural variability of high purity cordierite/steatite ceramics sintered from mixtures with various vermiculites [Electronic resource] / M. Valášková [et al.] // *Ceramics International*. 2014. Vol. 40. P. 8489–8498. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.060> (date of access: 15.11.2020).
2. Valášková M., Kočí K., Kupková J. Cordierite/steatite/CeO₂ porous materials — Preparation, structural characterization and their photocatalytic activity [Electronic resource] // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2014. Vol. 12. P. 120–125. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.12.035> (date of access: 15.11.2020).
3. Banjuraizah J., Mohamad H., Ahmad Z. A. Rietveld Quantitative Phase Analysis of Non-Stoichiometric Cordierite Synthesised from mainly Talc and Kaolin: Effect of Sintering Temperature [Electronic resource] // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol 173. P. 190–195. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.173.190 (date of access: 15.11.2020).
4. Banjuraizah J., Mohamad H., Ahmad Z. A. Effect of impurities content from minerals on phase transformation, densification and crystallization of α -cordierite glass-ceramic [Electronic resource] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. P. 7645–7651. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.04.129 (date of access: 15.11.2020).

5. Meagher E. P., Gibbs G. V. The polymorphism of cordierite: II. The crystal structure of indialite // Canadian Mineralogist. 1977. Vol. 15. P. 43–49.

6. Influence of Sintering Temperature on Crystallization Behavior of Cordierite synthesized from Non-Stoichiometric Formulation [Electronic resource] / K. K. Eing [et al.] // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 78. P. 01099. DOI: 10.1051/mateconf/20167801099 (date of access: 15.11.2020).

УДК 669.2

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ РЕАГЕНТНЫМ МЕТОДОМ

А. В. Никулин¹, Ю. С. Мороз², Н. А. Третьякова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ dr.vel145676@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен метод реагентной очистки сточных вод гальванических производств.

Ключевые слова: сточные воды, гальваническое производство, очистка реагентным методом, ионы тяжелых металлов, очистка от солей хрома

WASTE WATER TREATMENT OF ELECTROPLATING PLANTS BY REAGENT METHOD

A. V. Nikulin¹, Y. S. Moroz², N. A. Tretyakova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ dr.vel145676@mail.ru

Abstract. The paper considers the method of reagent treatment of waste water from electroplating plants.

Keywords: waste water, electroplating, reagent treatment, heavy metal ions, chromium salt treatment

Сточные воды гальванических производств представляют серьезную опасность для окружающей среды, поскольку содержат большое количество токсичных соединений, среди которых ионы тяжелых металлов, цианиды, соединения хрома (VI) (которые признаны канцерогенами), а также обладают низкими значениями pH. Согласно ГН 2.1.5.2280–07 [1] большинство металлов и их ионов относятся к I или II классу опасности.

Анализируя степень воздействия тяжелых металлов на природную среду, их можно расположить в следующий ряд (от наиболее опасного к менее опасному) [2]:



Вода в гальваническом производстве играет крайне важную роль: она используется для подготовки поверхностей деталей, приготовления и корректировки электролитов, профилактики оборудования, мойки готовых изделий. Основными источниками загрязнения воды становятся промывные воды и отработанные электролиты, а также растворы [2].

Условно все сточные воды гальванического производства делят на три группы:

- 1) хромосодержащие сточные воды (содержат в основном соединения Cr^{+6});
- 2) цианистые сточные воды (содержат в качестве основного компонента цианиды CN^-);
- 3) кислотно-щелочные сточные воды (содержат ионы различных тяжелых металлов, например, меди, цинка, никеля и др.).

В зависимости от содержания растворенных веществ в сточных водах их подразделяют на две группы:

- 1) малоконцентрированные (концентрация растворенных веществ находится в пределах 100–200 мг/л);
- 2) высококонтцентрированные (концентрация растворенных веществ достигает 250 мг/л) [3].

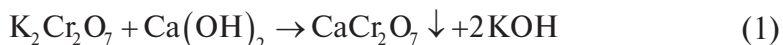
Концентрация хрома (VI) в сточных водах обычно составляет от 30 до 100 мг/л. ПДК для солей Cr^{+6} составляет 0,05 мг/л для объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [1].

Очистку сточных вод от соединений хрома (VI) реагентным методом проводят в два этапа:

- 1) перевод хрома (VI) в хром (III), который гораздо менее токсичен;
- 2) осаждение хрома (III) в форме гидроксида [4].

Для восстановления хрома (VI) до хрома (III) применяются различные реагенты-восстановители, среди которых натриевые соли сернистой кислоты (получившие наибольшее распространение), сернистые газы, металлическое железо или ионы двухвалентного железа. Наиболее перспективной является обработка сточных вод гидроксидом

кальция и гидроксидом бария. Использование такого метода позволяет автоматизировать процесс. Суть состоит в обработке $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до достижения pH 10,0–11,5 (1) и последующей обработке $\text{Ba}(\text{OH})_2$ до pH 11,5–12,4 (2):



Степень очистки составляет 95–96,2 % в зависимости от концентрации добавленных реагентов [5].

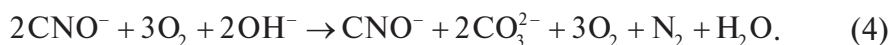
Интересным также является способ восстановления Cr (VI) с помощью жидких отходов производства антибиотиков, содержащих бутилацетат в концентрации до 2,6 г/л. Такой метод позволяет достигать значений предельно допустимой концентрации (ПДК) по хрому, а также снижать концентрацию бутилацетата примерно в 6–7 раз по сравнению с исходной [6].

Содержание цианидов в сточных водах обычно варьируется от 2 до 300 мг/л в зависимости от наличия ванн улавливания. ПДК для цианидов составляет 0,035 мг/л [1].

Суть реагентного метода очистки заключается в переводе цианидов в менее токсичные соединения. Для этого применяются различные окислители: хлорная известь, гипохлорит кальция, жидкий хлор, озон, перманганат калия, перекись водорода.

Наиболее перспективными являются применение озона и перекиси водорода. Использование этих реагентов помогают достигать высоких степеней очистки, избежать образования побочных токсичных соединений. К недостаткам можно отнести высокую энергоемкость процесса и громоздкость оборудования.

Для обезвреживания больших объемов сточных вод, но с невысокими концентрациями цианидов (менее 100 мг/л), рекомендуется использовать метод окисления озоном. Процесс протекает по реакциям (3), (4):



Для повышения эффективности процесса рекомендуется применять катализаторы, повышающие эффективность в 1,5–2 раза.

Для очистки высококонцентрированных ($[CN^-] > 1$ г/л) стоков наиболее эффективно применять перекись водорода. Продолжительность процесса составляет 30 мин при рН среды, равной 10–11. Процесс протекает по реакциям (5), (6) [2]:



Таким образом, применение реагентной очистки сточных вод гальванических производств является эффективным способом, реализуемым с применением ряда доступных реагентов.

Список источников

1. ГН 2.1.5.2280–07. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». URL: <https://base.garant.ru/12157244/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 06.12.2020)

2. Реагентная очистка сточных вод и утилизация отработанных растворов и осадков гальванических производств / Ю. П. Перелыгин [и др.]. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. 80 с.

3. Методические и нормативные материалы удельных расходов воды, химикатов, катионного и анионного состава химических загрязнений в промышленных стоках, поступающих на очистные сооружения из цехов электрохимической и химической обработки деталей: руководящие материалы. Р-90 065. VII редакция. М. : ГИПРОНИИАВИАПРОМ, 1990. 418 с.

4. Запольских А. К., Образцов В. В. Комплексная переработка сточных вод гальванического производства. Киев : Техника, 1989. 199 с.

5. Способ очистки сточных вод от шестивалентного хрома: а. с. 1323537 СССР: МКИ С 02 F 1/62, С 01 G 37/00 / В. А. Суворин [и др.] (СССР). № 3382641/23-26; опубл. 15.07.87, Бюл. № 26.

6. Перелыгин Ю. П., Безбородова О. Е., Зорькина О. В. Химическое обезвреживание хромсодержащих растворов и промывных сточных вод гальванического производства с использованием отходов производства антибиотиков // Гальванотехника и обработка поверхностей. 2004. Т. 12, № 4. С. 42–45.

УДК 544.654.2

СТАБИЛЬНОСТЬ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КРЕМНИЯ В РАСПЛАВЕ $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$

О. Б. Павленко¹, Ю. А. Устинова², А. В. Суздальцев³, Ю. П. Зайков⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ pavlenko.olga@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрена принципиальная возможность использования легкоплавкой эвтектики LiCl-KCl-CsCl с добавкой K_2SiF_6 для электролитического получения кремния.

Ключевые слова: электролитическое получение кремния, легкоплавкая эвтектика, LiCl-KCl-CsCl , K_2SiF_6 , термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, циклическая вольтамперометрия

Благодарности. Работа выполнена в рамках соглашения № 075-03-2020-582/1 от 18.02.2020 (номер темы 0836-2020-0037).

ON THE STABILITY AND ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF SILICON IN THE $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$ MELT

O. B. Pavlenko¹, Yu. A. Ustinova², A. V. Suzdaltsev³, Yu. P. Zaikov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ pavlenko.olga@urfu.ru

Abstract. The paper considers the fundamental possibility of using the low-melting eutectic LiCl-KCl-CsCl with the addition of K_2SiF_6 for the electrolytic production of silicon.

Keywords: electrolytic production of silicon, low-melting eutectic, LiCl-KCl-CsCl , K_2SiF_6 , thermogravimetry, differential scanning calorimetry, cyclic voltammetry

Acknowledgements. The research was carried out within the agreement No. 075-03-2020-582/1 from 18.02.2020 (No. 0836-2020-0037).

Разработка новых способов получения кремния с управляемой структурой и содержанием примесей имеет большое значение для современной промышленности. Перспективными представляются способы электролитического получения кремния из расплавленных солей. Показано, что такими методами могут быть получены осадки кремния различной структуры и морфологии: от тонких сплошных покрытий до наноразмерных волокон и порошков [1; 2].

Для получения высокочистого кремния особое внимание должно уделяться качеству солей и их химической активности по отношению к материалам электролизера. В частности, использование расплавленных солей с высоким содержанием фторидов и высокой рабочей температурой осложняет получение высокочистого кремния.

Для снижения агрессивности электролита и температуры процесса получения кремния могут быть использованы электролиты на основе легкоплавких эвтектик галогенидов щелочных металлов.

В настоящей работе рассмотрена принципиальная возможность использования легкоплавкой эвтектики LiCl-KCl-CsCl (температура плавления 263°C [3]) с добавкой K_2SiF_6 для электролитического получения кремния. Для этого методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии изучена термическая стабильность системы при температуре до 600°C , а методом циклической хроновольтамперометрии — кинетика катодного электровыделения кремния из расплава LiCl-KCl-CsCl с добавкой $0,25 \text{ мас. \% } \text{K}_2\text{SiF}_6$.

Эвтектическую смесь LiCl-KCl-CsCl готовили из индивидуальных хлоридов, которые предварительно очищали зонной перекристаллизации. Сплавление компонентов проводили в стеклоуглеродном тигле в герметичном боксе с атмосферой аргона. Термогравиметрические и калориметрические измерения проводили с использованием синхронного термоанализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter.

На рис. 1 приведена термограмма, полученная при нагреве эвтектической смеси LiCl-KCl-CsCl с добавкой $0,25 \text{ мас. \% } \text{K}_2\text{SiF}_6$ в атмосфере аргона при 600°C .

В ходе нагрева изменение массы образца не превышало $0,05 \%$, а при температуре $261,6^\circ\text{C}$ зафиксирован термический эффект, связанный с плавлением приготовленной смеси. На основании приведенных данных можно сделать вывод о термической устойчивости смеси LiCl-KCl-CsCl с добавкой K_2SiF_6 , что позволяет использовать ее для получения кремния.

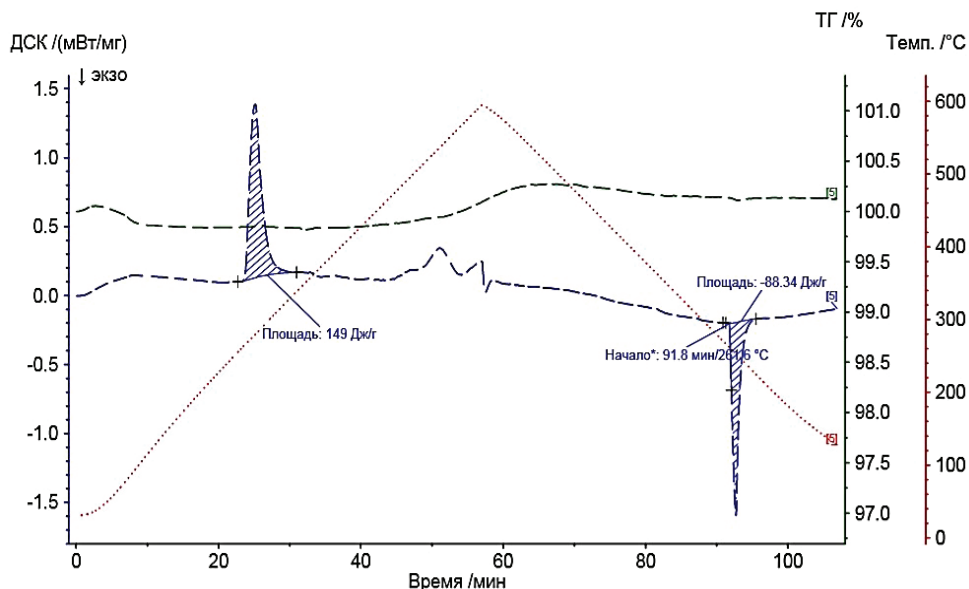


Рис. 1. Термограмма эвтектической смеси LiCl-KCl-CsCl с добавкой 0,25 мас. % K_2SiF_6

Электрохимические измерения проводили в кварцевой реторте в герметичном боксе с атмосферой высокочистого аргона. Стеклоуглеродный тигель с исследуемым расплавом $\text{LiCl-KCl-CsCl}-(0,25 \text{ мас. \%})\text{K}_2\text{SiF}_6$ размещали на дне реторты с фторопластовой крышкой. В крыше крепили экранированные кварцевыми трубками рабочий вольфрамовый электрод, кремниевый противоэлектрод и кремниевый квазиэлектрод сравнения. Измерения проводили методами циклической хроновольтамперометрии с использованием PGSTAT AutoLAB 302Ni ПО Nova 1.11 (The Metrohm, Нидерланды). В целях определения и компенсации омического падения напряжения в измерительной ячейке использовали процедуру прерывания тока (I-Interrupt).

Ни рис. 2 приведены типичные хроновольтамперограммы, полученные в расплаве $\text{LiCl-KCl-CsCl}-(0,25 \text{ мас. \%})\text{K}_2\text{SiF}_6$ при температуре 350°C со скоростями развертки потенциала 0,01 и 0,1 В/с. Из них можно отметить, что электровыделение кремния из исследуемого расплава начинается при потенциале около 0 В относительно потенциала кремниевого квазиэлектрода сравнения, при этом в области потенциалов около $-0,4$ В формируется пик.

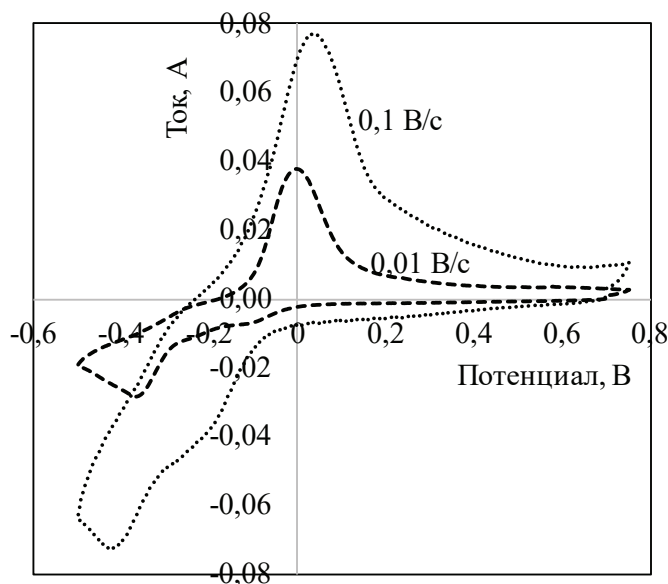


Рис. 2. Вольтамперограммы, полученные на вольфрамовом электроде в расплаве LiCl-KCl-CsCl с добавкой 0,25 мас. % K_2SiF_6 при температуре 350 °С и скоростях развертки потенциала 0,01 до 0,1 В/с

Таким образом, предварительные электрохимические измерения также указывают на принципиальную возможность синтеза кремния при электролизе расплавов на основе системы LiCl-KCl-CsCl .

Список источников

1. Электроосаждение кремния из расплава $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$ / Ю. П. Зайков [и др.] // Расплавы. 2016. № 5. С. 441–454.
2. Electrodeposition of continuous silicon coatings from the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melts [Electronic resource] / S. I. Zhuk [et al.] // J. Electrochem. Soc. 2017. Vol. 164 (8). P. H5135–H5138. DOI: 10.1149/2.0171708JES (date of access: 10.11.2020).
3. Heat of fusion of halide salts and their eutectics [Electronic resource] / A. Redkin [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Vol. 131. P. 2021–2026. DOI: 10.1007/s10973-017-6650-4 (date of access: 10.11.2020).

УДК 669.162.22

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. А. Першин¹, И. А. Гурин², Н. А. Спирин³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ dufaz@ya.ru

Аннотация. В работе показана необходимость контроля за распределением комбинированного дутья по воздушным фурмам доменной печи. Рассчитаны расходы горячего дутья через фурмы, параметры отдельных фурменных очагов. Представлено сравнение измеренного и требуемого расходов природного газа по фурмам доменной печи для поддержания теоретической температуры горения на заданном уровне.

Ключевые слова: энергоэффективность, доменная печь, моделирование, горячее дутье, природный газ, фурма

ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE COMBINED BLAST ON THE TUYERES OF A BLAST FURNACE

A. A. Pershin¹, I. A. Gurin², N. A. Spirin³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ dufaz@ya.ru

Abstract. The work shows the need to control the distribution of the combined blast through the air tuyeres of the blast furnace. The charges of hot blast through the tuyeres and the parameters of individual tuyeres are calculated. A comparison of the measured and required natural gas flow rates through the blast furnace tuyeres to maintain the theoretical combustion temperature at a given level is presented.

Keywords: energy efficiency, blast furnace, modeling, hot blast, natural gas, lance

При эксплуатации доменной печи реальное распределение дутья по фурмам далеко неравномерное: отмечаются различия в расходе дутья по отдельным фурмам, достигающие от 5 до 50 % [1–3]. Нерав-

номерное распределения дутья по фурмам приводит к разной протяженности фурменных очагов, что вызывает различие в сходе шихты в отдельных секторах печи, формируется деформированный газовый поток по сечению. Все это приводит к снижению производительности печи и ее энергоэффективности. По этой причине получение информации о распределении дутья по воздушным фурмам доменной печи является чрезвычайно важной задачей.

Опробованные в промышленных условиях методы контроля расхода дутья по воздушным фурмам доменной печи отличаются недолговечностью службы из-за высоких температур горячего дутья и его агрессивности; внедрение других приводит к снижению расхода дутья, подаваемого воздушными машинами, и к снижению производительности доменных печей [4; 5].

Ранее была разработана методика определения расхода дутья по воздушным фурмам, в основе которой лежит использование тепловой мощности потока, проходящего через фурму и значение теплосъема, снимаемого с этой фурмы [6]. При математическом моделировании принимается допущение, что при прохождении дутья через фурму часть теплового потока передается охлаждающей фурму воде, причем тем в большей степени, чем выше тепловая мощность прошедшего тепла. Предполагается также, что конструкции всех установленных на печи воздушных фурм одинаковы, одинакова и толщина стенок всех фурм, постоянны и коэффициенты теплопередачи от дутья к фурме и от фурмы к охлаждающей воде; коэффициент теплопроводности стенок фурм взят постоянным.

На основе данных о работе доменной печи № 1 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) выполнены расчет и оценка распределения горячего дутья и природного газа по фурмам. Исходные данные и основные результаты представлены в табл. 1–2.

Таблица 1

Показатели доменного процесса для расчета распределения горячего дутья и природного газа по фурмам доменной печи

№ п/п	Наименование показателя, ед. изм.	Значение
1	Полезный объем печи, м ³	1370
2	Производительность печи, т/сут.	2856
3	Удельный расход кокса, кг/т чугуна	418,6
4	Число воздушных фурм, шт.	20
5	Число работающих воздушных фурм, шт.	20
6	Диаметр фурм, мм	142

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование показателя, ед. изм.	Значение
7	Высот фурм, мм	350
8	Расход дутья, м ³ /мин	2567
9	Давление дутья, ати	2,5
10	Температура дутья, °С	1182
11	Влажность дутья, г/м ³	16,4
12	Содержание кислорода в дутье, %	25,12
13	Расход природного газа, м ³ /т чугуна	157,4

Таблица 2

Показатели доменного процесса и расчетные параметры
по фурмам доменной печи

Номер воздуш- ной фурмы	Показатели домен- ного процесса			Расчетные параметры					
	Измеренный расход газа на фурму, м ³ /ч	Расход воды на фур- му, м ³ /ч	Температурный пере- пад воды на фурме, °С	Количество тепла на нагрев воды, кВт	Расчетный расход дутья через фурму, м ³ /мин	Теоретическая темпе- ратура горения, °С	Скорость истечения дутья из фурм, м/с	Протяженность окис- лительной зоны, м	Требуемый расход газа для поддержания Т _г , м ³ /ч
1	908,5	11,41	11,25	149,1	132,9	2019	222,4	1,49	832
2	908,5	12,11	9,44	132,7	118,3	1975	200,6	1,34	741
3	917,6	12,83	8,17	121,7	108,5	1938	186,2	1,26	679
4	920,8	12,62	8,96	131,3	117,1	1966	199,1	1,33	733
5	921,4	12,26	9,60	136,6	121,8	1981	206,2	1,38	763
6	822,3	11,59	8,53	114,8	102,3	1958	174,5	1,19	641
7	925,3	12,50	10,59	153,7	137,1	2023	229,0	1,54	858
8	926,8	12,33	10,40	148,8	132,7	2011	222,6	1,49	831
9	921,8	11,81	9,56	131,1	116,9	1965	198,8	1,33	732
10	918,7	11,40	11,10	146,9	131,0	2009	219,8	1,47	820
11	920,7	13,41	10,33	160,9	143,4	2041	238,4	1,60	898
12	918,4	12,71	10,48	154,6	137,9	2028	230,0	1,54	863
13	854,0	13,25	11,09	170,7	152,2	2088	249,6	1,69	953
14	914,2	14,45	9,88	165,7	147,8	2054	244,7	1,65	925
15	830,0	13,62	8,47	133,9	119,4	2012	200,1	1,34	748
16	904,5	11,31	12,21	160,4	143,0	2046	237,3	1,60	896
17	910,5	13,63	8,58	135,8	121,1	1983	204,8	1,37	758
18	905,3	12,57	10,34	150,9	134,5	2024	224,7	1,51	842

Окончание табл. 2

Номер воздуш- ной фурмы	Показатели домен- ного процесса			Расчетные параметры					
	Измеренный расход газа на фурму, м ³ /ч	Расход воды на фур- му, м ³ /ч	Температурный пере- пад воды на фурме, °С	Количество тепла на нагрев воды, кВт	Расчетный расход дутья через фурму, м ³ /мин	Теоретическая темпе- ратура горения, °С	Скорость истечения дутья из фурм, м/с	Протяженность окис- лительной зоны, м	Требуемый расход газа для поддержания T _г , м ³ /ч
19	921,6	11,68	9,75	132,3	117,9	1968	200,4	1,34	738
20	910,6	11,52	10,97	146,8	130,9	2012	219,4	1,47	819

Выполненный расчет выявил неравномерность распределения дутья по фурмам и различие в значениях теоретической температуры горения на фурмах доменной печи. При неравномерном распределении дутья по фурмам для стабилизации теплового состояния в фурменных очагах требуется корректировка расхода природного газа на каждую фурму для сохранения теоретических температур горения на заданном уровне.

На рис. 1 представлена диаграмма сравнения измеренного и требуемого расходов природного газа по фурмам доменной печи.

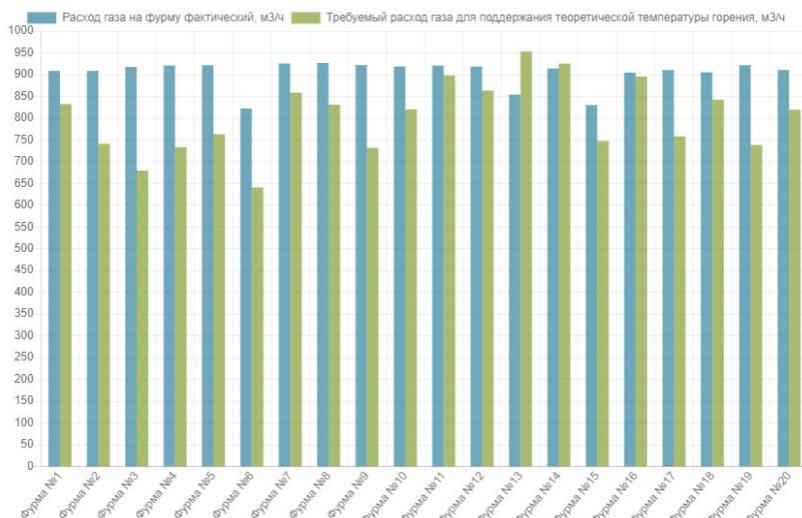


Рис. 1. Диаграмма изменения измеренного расхода природного газа на каждой фурме и расхода газа, требуемого для поддержания теоретической температуры горения на заданном уровне

Таким образом, оценка распределения параметров комбинированного дутья по фурмам доменной печи позволяет осуществлять оперативный контроль за распределением газового потока в различных секторах печи, контролировать скорость движения шихты и газа в этих секторах печи, протяженность зон горения, а также распределение температур в поперечном сечении горна, оптимизировать параметры процесса.

Список источников

1. Результаты оценки равномерности распределения дутья по фурмам доменных печей / М. Ю. Ширшов [и др.] // Теория и технология металлург. пр-ва. Магнитогорск : Изд-во МГТУ, 2014. № 2. С. 27–31.
2. Автоматизированная система контроля расхода дутья по воздушным фурмам доменной печи / Н. М. Можаренко [и др.] // Фундам. и приклад. проблемы чер. металлургии : сб. науч. тр. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2005. Вип. 11. С. 34–42.
3. Андронов В. Н., Белов Ю. А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // Сталь. 2002. № 9. С. 15–17.
4. Современный доменный процесс / М. Геердес [и др.]. М. : Металлургиздат, 2016. 280 с.
5. Изюмский Н. Н., Васильев А. П. Современные промышленные системы автоматизации доменных печей мира // Теория и практика производства чугуна : сб. тр. международ. науч.-техн. конф. Кривой Рог : Криворожсталь, 2004. С. 48–68.
6. Распределение дутья по воздушным фурмам доменной печи / А. А. Полинов [и др.] // Металлург. 2018. № 5. С. 23–27.

УДК 621.3

ЭЛЕКТРОПЕРЕНОС В ДВОЙНОМ ВАНАДАТЕ ИТТЕРБИЯ

В. М. Разгуляева¹, О. Н. Леонидова²

¹ Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹ lera.raz98@mail.ru

Аннотация. В работе синтезирован двойной ванадат $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$, изучено влияние температуры на электропроводность, термическое расширение и фазовые превращения.

Ключевые слова: глазеритоподобная структура, катионные проводники, двойные ванадаты, ортованадат иттербия, электропроводность

ELECTRIC TRANSFER IN DOUBLE VANADAT YTTERBIA

V. M. Razguliaeva¹, O. N. Leonidova²

¹ Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² Institute of solid state chemistry of UB RAS, Ekaterinburg, Russia

¹ lera.raz98@mail.ru

Abstract. Double vanadate $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ was synthesized and the effect of temperature on electrical conductivity, thermal expansion, and phase transformations was studied.

Keywords: glaserite-like structure, cationic conductors, double vanadates, ytterbium orthovanadate, electrical conductivity

Сложные оксидные соединения с глазеритоподобной структурой $\text{Na}_3\text{R}(\text{VO}_4)_2$, где $\text{R} = \text{PЗЭ}$, известны как перспективные лазерные и оптические материалы [1].

В $\text{Na}_3\text{R}(\text{VO}_4)_2$ каркас структуры образуют ванадиевые тетраэдры, между которыми размещаются катионы R^{3+} и Na^+ . Кроме того, в структуре имеются незаполненные междоузлия, по которым могут двигаться

ся ионы натрия, что позволяет рассматривать эти соединения как перспективные катионные проводники.

Исследуемые образцы получены методом твердофазного синтеза из карбоната кальция, оксидов Yb_2O_3 , и V_2O_5 при температурах 600–950 °С с гомогенизацией промежуточных продуктов. Рентгенографическую аттестацию проводили с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000. Электропроводность измеряли с использованием анализатора Solatron 1260 в интервале частот 1–10⁶ Гц. Термическое расширение исследовали на dilatометре LINSEIS L75V. Термический анализ проводили на воздухе с использованием термоанализатора Setaram. Ортованадат иттербия $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ имеет моноклинную структуру с пространственной группой $P2_1/n$. Параметры элементарной ячейки при комнатной температуре составили $a = 5,492 \text{ \AA}$, $b = 9,696 \text{ \AA}$, $c = 7,209 \text{ \AA}$ и $\beta = 93,25$ град.

Обнаруженный на кривой дифференциального термического анализа (ДТА) эндотермический эффект, который представлен на рис. 1, показывает, что выше 915 °С у ванадата $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$ имеется высокотемпературная модификация. Теплота фазового перехода составляет 58 Дж/г и показана на рис. 2.

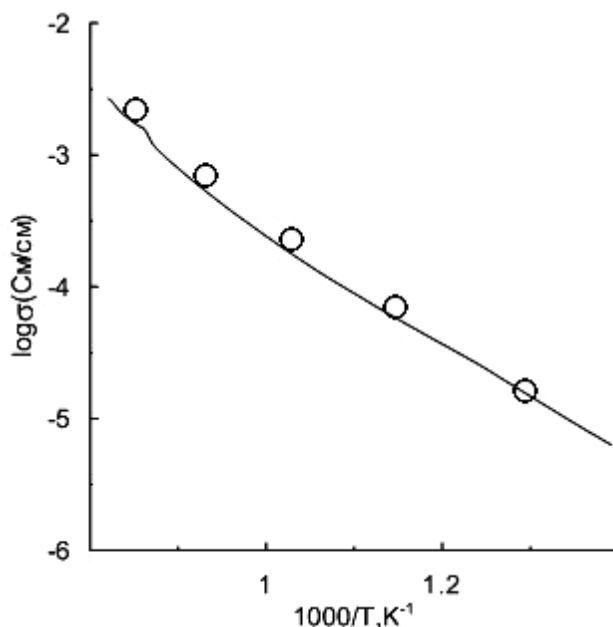


Рис. 1. Электропроводность $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$

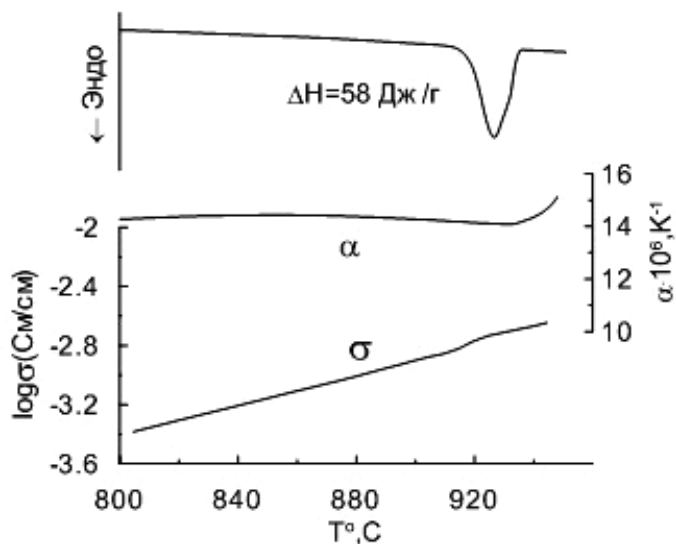


Рис. 2. Влияние температуры на электропроводность (σ), термическое расширение ($\Delta L/L_0$) и фазовые превращения ванадата $\text{Na}_3\text{Yb}(\text{VO}_4)_2$

Выше температуры фазового перехода резко увеличивается относительное удлинение керамического образца, и имеется небольшой скачок электропроводности. Электропроводность образца увеличивается с ростом температуры. Энергия активации (E_a) электропроводности ванадата до и после фазового перехода примерно одинакова и составляет 0,8 эВ. Значение E_a является типичным для натриевых проводников [2].

Список источников

1. Hydrothermal synthesis and spectroscopic properties of a new glaserite material, $\text{K}_3\text{Re}(\text{VO}_4)_2$ ($\text{Re} = \text{Sc}, \text{Y}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Yb}, \text{Lu}, \text{or Tm}$) with potential lasing and optical properties [Electronic resource] / M. M. Kimani [et al.] // Inorganic chemistry. 2012. Vol. 51, Iss. 24. P. 13271–13280. DOI: 10.1021/ic301922e (date of access: 12.11.2020).
2. Иванов-Шиц А. К., Мурин И. В. Ионика твердого тела : в 2 т. СПб. : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2000. Т. I. 616 с.

УДК 666.76

ПОЛУЧЕНИЕ ЛЕГИРОВАННОГО РЕАКТИВНОГО ГЛИНОЗЕМА ИЗ ПРИРОДНОГО ИЛИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

М. А. Сапожникова¹, К. Г. Земляной²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ sapozhnikova-11@yandex.ru

Аннотация. В работе исследована возможность легирования порошков оксида алюминия, получаемых кислым способом, добавками оксидов магния и циркония с целью улучшения их физико-химических свойств.

Ключевые слова: глинозем, оксид алюминия, фазовый состав

PRODUCTION OF ALLOYED REACTIVE ALUMINUM FROM NATURAL OR INDUSTRIAL RAW MATERIALS

M. A. Sapozhnikova¹, K. G. Zemlyanov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ sapozhnikova-11@yandex.ru

Abstract. The paper reviewed the production of alumina by the acid method. The dependence of the change in the phase composition on the firing temperature is analyzed. The process of sulfuric acid leaching is considered.

Keywords: alumina, aluminium oxide, phase composition

По мере возрастания потребления алюминия возрастает количество отходов, образующихся в процессе производства глинозема по модифицированному методу Байера. На начало 2018 г. в РФ накоплено около 600 млн т красных шламов. Из общего количества техногенных отходов в России 23 %, т. е. более 137 млн т, приходится на Свердловскую область. Ежегодно это число возрастает на 7–8 млн т, в т. ч. накапливается большое количество алюминийсодержащих техно-

генных материалов (красные шламы, шлаки алюминиевого производства, отходы обогащения глин и каолинов, металлургические шлаки).

В то же время в РФ практически отсутствует производство безщелочного химически активного оксида алюминия, импорт которого на 2019 г. составил более 60 тыс. т, в основном из КНР, Германии и США, для обеспечения потребностей оборонной промышленности и производства компонентов электроники.

Обеспечение российских производителей отечественным безщелочным глиноземом — одна из важных проблем алюминиевой промышленности РФ. В настоящее время глиноземные заводы по всему миру производят металлургический глинозем, в большей степени по различным модификациям метода Байера.

Из-за остаточного содержания щелочи в металлургическом глиноземе (до 0,5 мас. %) и специфической формы частиц — полых сфер — становится невозможным получение специальных видов керамики, требующих высокую прочность, температуру применения и электроизоляционные свойства (бронекерамика, керамика для электронной промышленности) вследствие процессов собирательной рекристаллизации, обусловленных присутствием остаточной щелочи и, как следствие, образованием жидкой фазы при обжиге. Щелочь также понижает температуру плавления и повышает электропроводность корундовой керамики.

Известны методы получения высокочистых безщелочных порошков Al_2O_3 на основе сырья Уральского региона [1–3]. Самый доступный и экономически целесообразный способ получения — модификация сернокислотного выщелачивания, позволяющий использовать в качестве сырья техногенные отходы металлургии, горнодобывающей промышленности, машиностроения.

Еще одним преимуществом указанного способа является возможность легирования получаемого оксида алюминия в целях модификации свойств получаемой из него керамики и (или) огнеупоров под конкретные условия службы. Легирование может осуществляться на стадии получения водного раствора чистого (после дробного осаждения примесей) сульфата алюминия введением расчетного количества водорастворимых солей соответствующих катионов, что позволяет эффективно смешивать катионы с дальнейшим их совместным осаждением и термообработкой до исходных порошков для получения готовой продукции.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности получения чистого легированного оксида алюминия для огнеупорной и керамической промышленности. В качестве исходных материалов в работе использовали: алюминия сульфат $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$, магний азотнокислый технический $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, цирконий сернокислый основной технический $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$.

Технологически процесс реализован следующими этапами:

- 1) расчет состава смеси из исходного сырья в соотношении $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}, \text{ZrO}_2) = 99/1, 97/3, 95/5$. В заданных соотношениях смешение сырья в водном растворе;
- 2) осаждение полученного раствора аммиачной водой;
- 3) промывание полученного осадка;
- 4) сушка при 100°C ;
- 5) помол в шаровой мельнице;
- 6) обжиг в интервале температур $500\text{--}1400^\circ\text{C}$ с контролем фазового состава полученных материалов.

Фазовый состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на дифрактометре с вращающимся анодом Miniflex 600 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda = 1,541862 \text{ \AA}$; интервал съемки — $3,00\text{--}60,00$; шаг сканирования — $0,02$), Rigaku — Carl Zeiss (Япония) с программами управления и сбора данных MiniFlex guidance и пакетом обработки данных PDXL Basic. Идентификацию дифракционных максимумов проводили с использованием банка данных JSPDS. Полуколичественную оценку содержания фаз проводили с использованием корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio) по методу Чанга (Chung) [4].

Установлено, что:

- 1) в результате гидрохимического передела получают порошки, состоящие из полуаморфных гидроксидов алюминия и легирующей добавки (магния, циркония);
- 3) чистый гидроксид алюминия переходит в форму $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при термообработке выше 1200°C ;
- 4) гидроксид алюминия, легированный магнием, переходит в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при обжиге выше 1200°C с образованием второй фазы — шпинели $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{MgO}$. При этом образцы с добавкой оксида магния в количестве 1 и 3 мас. % с увеличением температуры обжига до 1400°C показывают уменьшение количества шпинели за счет образования твердых растворов магния в оксиде алюминия;

5) гидроксид алюминия, легированный цирконием, переходит в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при обжиге выше 1300 °С. При этом в образцах с содержанием ZrO_2 1 и 3 мас. % образуются только твердые растворы оксида циркония в корунде, а при добавке 5 мас. % появляется вторая фаза ZrO_2 .

Таким образом, установлено, что в процессе гидрохимической переработки техногенных отходов с получением чистого безщелочно-го оксида алюминия технически возможно легировать получаемый продукт с целью модификации его структуры и свойств. Установлены пределы растворимости легирующих добавок MgO и ZrO_2 в корунде.

Список источников

1. Кашеев И. Д., Земляной К. Г., Степанова К. О. Кислотные методы производства глинозема: обзор [Электронный ресурс] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 60, № 3. С. 237–242. DOI: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-6-3-9> (дата обращения: 08.11.2020).
2. Кашеев И. Д., Земляной К. Г., Доронин А. В.. Разработан-ка технологии получения высокочистых порошков Al_2O_3 на основе сырья Уральского региона [Электронный ресурс] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020. Vol. 61, № 2. Р. 192–195. DOI: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-4-20-23> (дата обращения: 08.11.2020).
3. Гидрохимическая переработка красных шламов, производимых АО «Алюминий Казахстана» / С. В. Будон [и др.] // *Зап. Гор. ин-та*. 2013. № 202. С. 44–47.
4. Hubbard C. R., Evans E. H., Smith D. K. The Reference Intensity Ratio for Computer Simulated Powder Patterns [Electronic resource] // *J. Appl. Cryst.* 1976. Vol. 9, № 2. Р. 169–174. DOI: [10.1107/S0021889876010807](https://doi.org/10.1107/S0021889876010807) (date of access: 08.11.2020).

УДК 628.9.03

СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

**А. В. Тепикина¹, В. С. Костров², Н. О. Прохоренков³,
В. Н. Самойлов⁴, С. Г. Власова⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ anna.tepikinaa@gmail.com

Аннотация. Синтезированы и исследованы литий-боратные стекла, активированные ионами европия и самария, для «связывания» кристаллического люминофора в светодиодах. Отработан режим спекания стекольной фритты с тонкодисперсным алюмоиттриевым гранатом. Измерены спектральные характеристики полученных люминесцирующих композитов, рассмотрены диаграммы цветности.

Ключевые слова: стеклокристаллический композит, алюмоиттриевый гранат АИГ, литий-боратное стекло, светодиод, диаграмма цветности, РЗЭ

GLASS-CRYSTAL COMPOSITES FOR CREATING ENERGY-EFFICIENT WHITE LIGHT-EMITTING DIODES

**A. V. Tepikina¹, V. S. Kostrov², N. O. Prohorenkov³,
V. N. Samoylov⁴, S. G. Vlasova⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ anna.tepikinaa@gmail.com

Abstract. Lithium-borate glasses doped with oxide and samarium oxide for “binding” crystal phosphor in light-emitting diodes have been synthesized and studied. The sintering mode of glass Frit with fine aluminum-yttrium garnet has been worked out. The spectral characteristics of the obtained luminescent composites are measured, and the chromaticity diagrams are considered.

Keywords: luminescent composite, yttrium-aluminum garner, lithium-borate glass, light-emitting diode, rarely-earth elements (REE)

Одним из перспективных путей энергосбережения является применение светодиодов. Светодиоды качественно отличаются от ламп накаливания, газоразрядных (люминесцентных) ламп.

Светодиод или светоизлучающий диод (Light-emitting diode, LED) — полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом или контактом «металл — полупроводник», создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, в частности его спектральные характеристики зависят от химического состава использованных в нем полупроводников [1].

Люминофорами называют вещества, способные преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение — люминесцировать под действием различного рода возбуждений. Применение порошковых люминофоров для создания твердотельных источников света связано с использованием клея на органической основе, что ограничивает их температурный диапазон применения. Люминофор, заключенный в стеклянную теплоотводящую матрицу, более термо- и химически стабилен [2; 3]. Кроме того, можно использовать люминесцирующее стекло для преобразования определенного лазерного излучения в видимую область спектра.

Для решения этой проблемы ведется разработка люминесцирующего композита типа «люминофор в стекле». Синтезированы стекла на литий-боратной основе с добавками редкоземельных оксидов: $B_2O_3-Li_2O$ в соотношении 70: 30 и оксид Eu_2O_3 или Sm_2O_3 . Синтезированные стекла исследовали с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и дилатометрии.

Технология спекания композита с люминофорами «алюмоиттриевый гранат» (АИГ): Ce^{3+} с максимумами излучения на длинах волн 525 нм (LE-525) и 570 нм (LE-570) [4] отрабатывается с учетом многих составляющих (свойств стекла, размеров гранул, процентного соотношения стекло — люминофор, способа перемешивания, уплотнения структуры прессованием, легирования стекла редкоземельными элементами).

Измельчение проводилось на установке Fritsch PULVERISETTE 7; спекание — в муфельной печи при температуре 750 °С. Структура композитов рассматривалась на микроскопе Levenchuk D870T. Оптическая микроскопия показала близость показателей преломления выбранных стекол и люминофоров. Спеченные однородные образцы были подвергнуты спектральному анализу с помощью волоконно-оптического спектрометра USB4000-UV-VIS. Спектральные характеристики луч-

ших образцов (стекла содержат оксид самария) имеют максимум излучения на $\lambda = 570$ нм. Цвет излучения других композитов, содержащих в составе стекла оксид европия, имел слабые цветные оттенки. На рис. 1 представлены их диаграммы цветности.

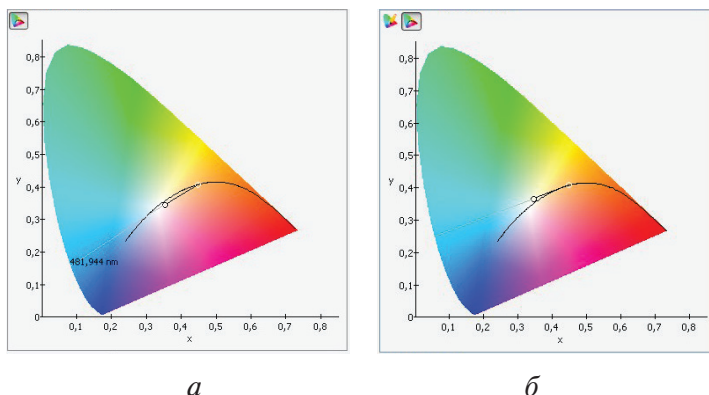


Рис. 1. Диаграммы цветности композитов $\text{Li}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ (а) и $\text{Li}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{:Sm}$ (б)

В результате анализа спектральных данных установлено, что образец, состоящий из стекла $\text{Li}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{:Sm}$ и люминофоров LE 525 и LE 570, излучает истинный белый свет, сопоставимый с источником излучения, и имеет цветовую температуру 5079 К, индекс цветопередачи составил 63,5.

Можно сделать вывод, что этот вид источников света имеет высокий КПД, большой срок эксплуатации, потребляет малое количество электроэнергии.

Список источников

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М. : Физмалит, 2008. 496 с.
2. Неорганические люминофоры / О. Н. Казанкин [и др.]. Л. : Химия, 1975. 192 с.
3. Nishiura S., Tanabe S. Preparation and optical properties of Eu^{2+} and Sm^{3+} co-doped glass ceramic phosphors emitting white color by violet laser excitation [Electronic resource] // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2008. Vol. 116, Iss. 1358. P. 1096–1099. DOI: 10.2109/jcersj2.116.1096 (date of access: 10.11.2020).
4. Ковтун Г. П. Иттрий-алюминиевый гранат с неодимом: методы выращивания и свойства монокристаллов / Г. П. Ковтун, А. И. Кравченко, А. П. Щербань // Препринт ХФТИ. 2004. № 2. С. 14–30.

УДК 666.1.03

ОТХОДЫ ШЛАКОВАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА — В ПЕНОСТЕКЛО

Р. Ф. Хазиахметова¹, Д. А. Мещерских², М. Ю. Углинских³, С. Г. Власова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ r.f.khazhiakhmetova@urfu.ru

Аннотация. В работе рассматривается возможность использования отходов шлаковатного производства и стеклотарной промышленности в качестве исходного сырья для изготовления плитных теплоизоляционных и шумопоглощающих материалов и пеностеклощепня для строительства. Отработан режим вспенивания стеклогранулята с добавками тонкоизмельченного волокна — «королька», брака в производстве шлаковаты. В состав шихты может входить до 15 мас. % отходов шлаковаты.

Ключевые слова: вспенивание, гранулометрический состав, газообразователь, стеклобой, теплопроводность, объемная масса, микрокальцит, ячеистый теплоизоляционный материал

WASTE FROM SLAG PRODUCTION — INTO FOAM GLASS

**R. F. Khazhiakhmetova¹, D. A. Meshcherskikh²,
M. Y. Uginskikh³, S. G. Vlasova⁴**

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ r.f.khazhiakhmetova@urfu.ru

Abstract. The paper considers the possibility of using waste slag production and glass container industry as a raw material for the manufacture of plate heat-insulating and noise-absorbing materials and foam glass for construction. The mode of foaming of glass granulate with additions of finely ground fiber — “korolyek”, wastes in the production of slag wool was worked out. The charge can include up to 15 wt. % of waste is slag.

Keywords: foaming, particle size distribution, blowing agent, cullet, thermal conductivity, bulk density, microcalcite, cellular heat-insulating material

На строительном рынке сегодня большое разнообразие тепло- и звукоизоляционных материалов, но не все из них являются эффективными тепло- и звукоизоляторами, шумопоглотителями и сочетают в себе такие свойства, как негорючесть, прочность, долговечность, экологичность, легкость в обработке и установке. Минеральная вата востребована до сих пор, но многие предприятия по производству шлаковаты устарели, имеют большой процент брака — на старых производствах он достигает 50 %.

Отвалы подобных производств и бой использованных стеклянных изделий загрязняют почву, а могут послужить дешевым сырьем для создания нового строительного материала.

Цель настоящей работы — исследование возможности синтеза ячеистого тепло- и звукоизоляционного материала на основе стекольного тарного боя с использованием микрокальцита в качестве газообразователя и шлаковаты как добавки.

Для этого необходимо было определить оптимальный размер частиц компонентов шихты, допустимое количество добавки шлаковаты, отработать температурный режим вспенивания смеси и охлаждения, исследовать физико-химические свойства полученных образцов, проверить их на соответствие строительным стандартам. В табличной форме приведен химический состав отходов шлаковаты, мас. %:

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	CO_2	TiO_2	Cr_2O_3	MnO
48,44	15,88	17,90	12,14	3,46	1,61	0,24	0,23	0,1

Большую роль при создании подобных материалов играют температурно-вязкостные характеристики: возникают трудности при вспенивании и создании прочной ячеистой структуры — тарное стекло (тара из-под химических реактивов) размягчается раньше, чем тугоплавкие «корольки». Для всех компонентов смеси проведен анализ дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). На рис. 1 представлена кривая ДСК для шлаковаты, на которой наблюдается несколько минимумов. Плавление ваты (корольков) происходит при температурах выше 1200 °С.

Режим вспенивания шихты отрабатывали в интервале температур от 800 до 900 °С при разных временных выдержках при максимальной температуре и разных скоростях охлаждения. Отжигали вспененные

образцы в интервале 580–600 °С. На рис. 2, 3 представлены образцы, вспененные с помощью микрокальцита.

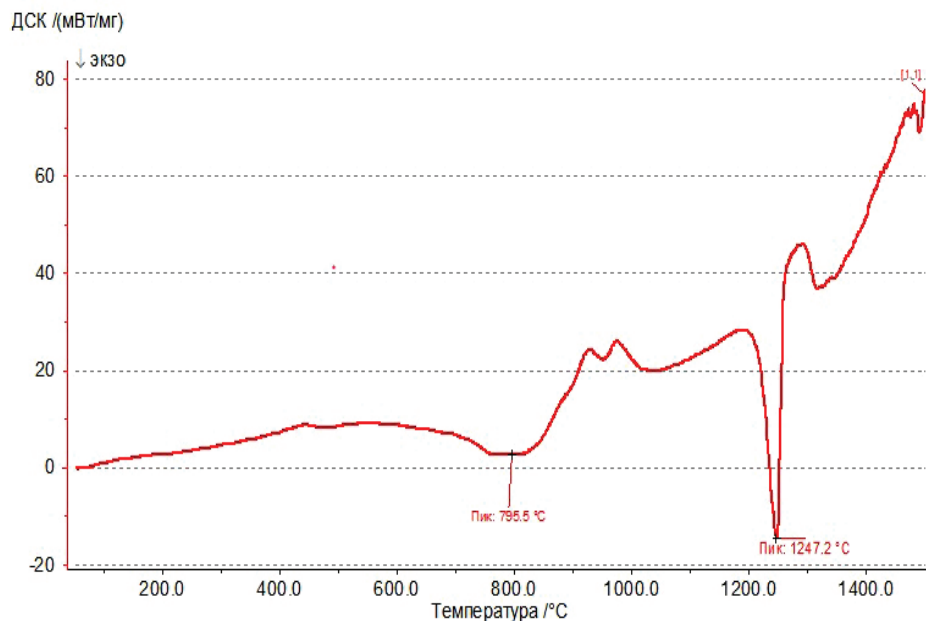


Рис. 1. Кривая ДСК шлаковаты

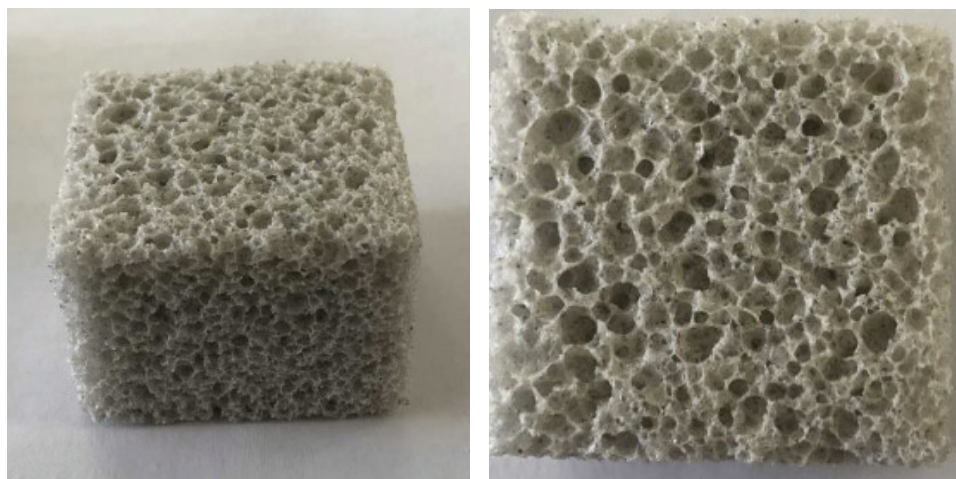


Рис. 2. Содержание шлаковаты — 5%, микрокальцита — 0,7%,
 $T_{всп} = 860\text{ °C}$



Рис. 3. Содержание шлаковаты — 15 %, микроальцита — 0,7 %, $T_{всп} = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исследования показали, что процессы структурообразования пористого материала определяются дисперсностью компонентов пенообразующей смеси. Объемная масса плитного пеностекла увеличивается с ростом доли шлака в пределах от 200 до 320 кг/м³. При этом увеличивается механическая прочность (до 1,54 МПа). Теплопроводность уменьшается от 0,12 до 0,065 Вт/(м² · °С), водопоглощение — с 45 до 15 %. Испытания на водопоглощение показали, что наряду с закрытыми порами присутствуют сообщающиеся. Такой материал в большей мере подходит для применения в качестве шумопоглощающего, можно использовать для внутренней звуко- и теплоизоляции.

Все сырьевые материалы находятся на Среднем Урале, что позволяет запустить недорогое производство, продукция которого в условиях климата Урала и Сибири будет востребована.

УДК 666.762

УТИЛИЗАЦИЯ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ

В. Э. Шварцкопф¹, Г. С. Гиренко², Е. П. Фарафонтова³, И. А. Павлова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

⁴ i.a.pavlova@urfu.ru

Аннотация. В работе исследованы свойства побочных тонкодисперсных продуктов, возникающих при производстве керамической плитки, и приведен обзор способов их использования. Исследованы свойства образующихся побочных продуктов, так называемых кеков полировки. Кек полировки представляет собой преимущественно стеклообразную фазу порядка 80 %, кварц — 14 %, муллит — 5 %. Размер частиц кека полировки составляет менее 0,2 мм. По результатам исследования свойств продуктов можно определить следующие пути утилизации: в качестве наполнителя для производства силикатных, полимерцементных, водно-дисперсионных, масляных красок, наполнителя для производства кровельных материалов, битумных кровельных мастик на основе органических вяжущих материалов, сырьевых компонентов для изготовления материалов и изделий из пеностекла.

Ключевые слова: керамическая плитка, отходы керамических производств, керамогранит, полировка, ректификация

UTILIZATION OF BY-PRODUCTS OF CERAMIC TILE PRODUCTION

V. E. Shvarczkopf¹, G. S. Girenko², E. P. Farafontova³, I. A. Pavlova⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

⁴ i.a.pavlova@urfu.ru

Abstract. The properties of finely dispersed by-products arising in the production of ceramic tiles are investigated, and an overview of the methods of their use is given. The properties of the formed by-products, the so-called polishing cakes, have been investigated. The polishing cake is mainly a glassy phase of 80 %, quartz —

14 %, mullite — 5 %. The particle size of the polishing cake is less than 0.2 mm. The results of studying the products properties lead to the following disposal ways: as a filler in the silicate production, polymer-cement, water-dispersion and oil paints, as a filler in production of roofing materials, as bituminous roofing mastics based on organic binders, as raw materials in foam glass production

Keywords: ceramic tile, by-products of ceramic tile production, porcelain stoneware, polishing, rectification

При производстве различных видов керамической плитки используют полировку поверхности плитки для получения глянцевой поверхности керамогранита и для устранения различных дефектов глазурованной поверхности плиток [1–3]. Кроме того, проводят ректификацию боковых граней плитки для придания ей точных размеров в пределах одного калибра. Такие побочные продукты образуются в небольшом количестве, но с течением времени скапливаются и возникает вопрос об их утилизации.

Актуальной задачей любого современного производства является вопрос разработки безотходного производства [1; 2]. Настоящая работа посвящена исследованию свойств, образующихся при производстве керамогранита побочных продуктов и определению путей их утилизации, что решает ряд вопросов ресурсосбережения — вовлечение некондиционного сырья в производство.

Химический состав кека полировки (мас. %) представлен в табличной форме:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O
63,72	27,41	0,89	0,368	4,56	1,74	4,56

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) минеральный состав кека: кварц — 14 %, муллит — 5 %, корунд — 0,2 %, кальций-натриевый полевой шпат — до 1 %, стеклофаза — 80 %. Корунд, муллит и кварц попадает в состав кека в результате износа абразивных материалов, используемых при шлифовании. Стеклофаза входит как в состав плитки, так и в состав кристаллины. Истинная плотность кека составляет 1,18–1,24 г/см³. Максимальный размер зерен не превышает 0,5 мм. Содержание фракции более 0,2 мм — 3 %; менее 0,2 мм — 97 %.

Кек представляет собой тонкодисперсный материал белого цвета и может быть утилизирован в областях, представленных в таблице.

Таблица

Возможные области утилизации кека полировки

№ п/п	Область применения	Нормативный документ
1	Наполнитель для строительных смесей	ГОСТ 31424–2010. Материалы строительные нерудные из отсевов дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия.
2	Наполнитель для производства кровельных материалов на основе органических вяжущих материалов	ГОСТ 10923–93. Рубероид. Технические условия (с изменением № 1)
3	Наполнитель при устройстве оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов	ГОСТ 16557–78. Порошок минеральный для асфальтобетонных смесей. Технические условия
4	Наполнитель для производства силикатных красок	ГОСТ 18958–73. Краски силикатные
5	Наполнитель для производства полимерцементных красок	ГОСТ 19279–73. Краски полимерцементные
6	Наполнитель для производства водно-дисперсионных красок	ГОСТ 28196–89. Краски водно-дисперсионные. Технические условия (с изменением № 1)
7	Наполнитель для производства масляных красок	ГОСТ 30884–2003. Краски масляные, готовые к применению. Общие технические условия
8	Наполнитель для производства битумных кровельных мастик	ГОСТ 2889–80. Мастика битумная кровельная горячая. Технические условия
9	Альтернативный наполнитель вместо микрокальцита	ГОСТ Р 56775–2015. Микрокальцит для строительных материалов. Технические условия

Список источников

1. Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies [Electronic resource] / F. Andreola [et al.] // Ceram. Int. 2016. Vol. 42. P. 13333–38. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.05.205 (date of access: 14.11.2020).

2. Ceramic Tile Formulations from Industrial Waste / J. A. Junkes [et al.] // Interceram: International Ceramic Review. 2011. Vol. 60 (1). P. 36–41.

3. Esposito L., Tucci A., Naldi D. The reliability of polished porcelain stoneware tiles [Electronic resource] // Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. P. 1487–1498. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.030 (date of access: 14.11.2020).

УДК 628.17

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАМКНУТОГО ВОДООБОРОТНОГО ЦИКЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ПРОПАНА

В. Е. Яковлев¹, Ю. И. Нейн²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² y.i.nein@urfu.ru

Аннотация. В работе рассмотрено применение системы замкнутого водооборотного цикла в производстве дегидрирования пропана. Рассчитана экономическая эффективность инвестиций.

Ключевые слова: ресурсосбережение, вода, замкнутый водооборотный цикл, дегидрирование пропана, пропилен

USE OF A CLOSED WATER CYCLE SYSTEM IN THE PRODUCTION OF PROPANE DEHYDROGENATION

V. E. Yakovlev¹, Yu. I. Nein²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² y.i.nein@urfu.ru

Abstract. The article discusses the use of a closed water cycle system in the production of propane dehydrogenation. The economic efficiency of investments is calculated.

Keywords: resource saving, water, closed water cycle, propane dehydrogenation, propylene

Дегидрирование пропана является достаточно энергоемким процессом химической промышленности. Для технологических нужд требуется большое количество тепла, водяного пара и воды. Два последних ресурса ставят перед инженерами и конструкторами производств задачу грамотного планирования и проектирования систем водоснабжения и водоотведения.

Производства, требующие большого количества водных ресурсов, являются наиболее сложными в связи с тем, что необходимо проектирование и создание мощных водоочистных сооружений и сооружений по очистке химически загрязненных сточных вод.

Системы производственного водоснабжения могут быть:

1) прямоточными, в которых подаваемая от первичного источника вода после однократного использования отводится за пределы предприятия;

2) оборотными, в которых отработанная вода подвергается охлаждению, очистке и возвращается для последующего использования в этом же производстве, т. е. замыкается в цикле.

Существенный недостаток прямоточного водоснабжения — необходимость сброса отработанных вод в водоемы. Эти системы используются только на старых предприятиях.

Использование замкнутых систем позволяет снизить расходы на очистку воды на подпитку, которая составляет до 2 % в связи с малыми потерями (которые можно сделать еще меньше путем увеличения герметичности системы), а также уменьшить количество сточных вод и, соответственно, затраты на производство очистных сооружений.

Схема производственного оборотного водоснабжения предприятия включает в себя комплекс сооружений, обеспечивающих прием воды из водозабора, подачу ее потребителям в необходимом количестве под требуемым давлением, очистку, обработку и охлаждение.

Объединение производств пропилена (путем дегидрирования пропана) и полипропилена в один технологический процесс позволяет получать высокомаржинальный продукт в результате переработки попутного нефтяного газа, обладающего низкой стоимостью, что в итоге обеспечивает предприятие высокими показателями прибыли.

В связи с большой мощностью производства возникает необходимость в большом количестве водных ресурсов, которая направляется на выработку пара и другие технологические нужды, а также в качестве теплофикационной воды. Для уменьшения затрат на водоподготовку и очистку сточных вод на предприятии реализован замкнутый водооборотный цикл.

Процесс обработки сточных вод и возврата их в технологический цикл имеет незначительные отличия от классической технологии замкнутого водооборотного цикла и состоит из следующих стадий:

1) сбор конденсата. Технологический конденсат поступает в коллектор конденсата с паровых турбин технологических компрессоров установки компримирования, установки сепарации, паровых турбин технологических насосов установки дегидрирования пропана и направляется в емкость сбора конденсата, проходя через стадии 2 и 3;

2) охлаждение. После сбора конденсат распределяется на 3 потока и проходит через 3 пластинчатых теплообменника. В них происходит рекуперация тепла возвращенного конденсата и нагрев конденсата, направляемого из емкости на технологические нужды;

3) очистка. Конденсат после теплообменников объединяется в один поток и далее направляется в узел очистки, состоящий из угольных фильтров, работающих поочередно. При этом каждый фильтр имеет три режима работы: ожидание, работа и промывка адсорбента;

4) подпитка. В системе имеются негерметичные участки, а также возможны потери в связи с испарением воды в окружающую среду. В связи с этим организована подпитка системы подготовленной водой. Она осуществляется путем подачи воды с установки фильтрации, включающей системы механической очистки и мембранные системы. Кроме того, организована подпитка системы деминерализованной водой с производства электротеплопарогенерации (ЭТПГ).

Таким образом, собранный конденсат с предприятия полностью собирается, обрабатывается и возвращаются в производственный цикл. При этом потери воды из системы составляют не более 2 %.

Использование промышленной оборотной воды снижает количество используемой воды из водозабора, а также уменьшает количество сточных вод, что положительно сказывается на экологической ситуации в районе производства.

Оценка экономической эффективности инвестиций в проектирование и реализацию замкнутого водооборотного цикла осуществлена с помощью статических методов: расчета простой нормы прибыли и срока окупаемости.

Простая норма прибыли [1] показывает, какая часть инвестиционных затрат возвращается в виде прибыли в год, например:

$$P_{\text{и}} = \frac{\Delta\Pi_{\text{ч}}}{K_{\text{доп}}} = \frac{62000}{300000} \cdot 100 \% = 21\%,$$

где $P_{\text{и}}$ — рентабельность инвестиций; $\Delta\Pi_{\text{ч}}$ — прирост чистой прибыли за год, тыс. р.; $K_{\text{доп}}$ — дополнительные капитальные вложения, тыс. р.

Срок окупаемости представляет собой период, в течение которого весь объем генерируемых проектом денежных средств, куда входят суммы прибыли и амортизации, направляется на возврат первоначально инвестируемого капитала [1]. При этом важно, чтобы капитальные вложения окупались как можно быстрее, например:

$$T_o = \frac{K_{\text{доп}}}{\Delta\Pi_{\text{ч}} + \Delta A_{\text{год}}} = \frac{300000}{62000 + 12} = 4,8 \text{ лет} = 58 \text{ мес.},$$

где T_o — срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет; $\Delta A_{\text{год}}$ — прирост амортизационных отчислений, тыс. р.

Сброс в водоемы общего пользования производственных вод требует правильной очистки последних, в противном случае это может привести к губительным последствиям для экосистем. По этой причине внедрение систем замкнутого водооборотного цикла на предприятиях в целях ресурсосбережения является экономически обоснованным и снижает неблагоприятное воздействие на окружающую среду, а также позволяет снизить забор свежей воды из природных водоемов.

Список источников

1. Высоцкая Н. Я., Тихонравова Л. Н. Экономическое обоснование дипломных проектов по техническому перевооружению химических производств. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. 52 с.

Раздел 3
Нетрадиционные
и возобновляемые источники
энергии. Неуглеродная
и малая энергетика

УДК 546.682.3; 221.1

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО БУФЕРНОГО СЛОЯ ZnS ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. Н. Беззаботнова¹, Е. П. Аккузина², А. В. Поздин³, Л. Н. Маскаева⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ bezzabotnova009@gmail.com

Аннотация. Тонкие пленки ZnS перспективны в качестве буферного слоя в солнечных элементах. Для получения тонкопленочного сульфида цинка перспективным является метод химического осаждения из водных сред. Предварительно проведена термодинамическая оценка граничных условий химического осаждения твердой фазы ZnS в реакционных системах $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--CH}_3\text{CSNH}_2$ и $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--CSN}_2\text{H}_4$.

Ключевые слова: термодинамическая оценка, химическое осаждение, тонкие пленки, ZnS

FORECASTING CONDITIONS OF CHEMICAL DEPOSITION OF A THIN-FILM BUFFER LAYER ZNS FOR SOLAR CELLS

A. N. Bezzabotnova¹, E. P. Akkuzina², A. V. Pozdin³, L. N. Maskaeva⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ bezzabotnova009@gmail.com

Abstract. Thin ZnS films are promising as a buffer layer in solar cells. For the preparation of thin-film zinc sulfide, the method of chemical precipitation from aqueous media is promising. A preliminary thermodynamic assessment of the boundary conditions for the chemical deposition of the ZnS solid phase in the reaction systems $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--CH}_3\text{CSNH}_2$ and $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--N}_2\text{H}_4\text{CS}$ was carried out.

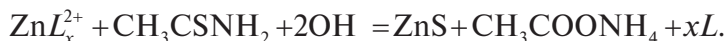
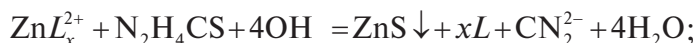
Keywords: thermodynamic evaluation, chemical deposition, thin films, ZnS

Широкозонный полупроводник сульфид цинка ZnS (3,68 эВ) благодаря уникальным оптическим свойствам, в частности высокой пропускной способности в большом интервале длин волн и низкому коэффициенту отражения, перспективен в качестве буферного слоя в солнечных элементах и позволяет улучшить эффективность преобразования излучения в солнечных элементах [1; 2].

Перспективным методом получения тонких пленок сульфида цинка является химический метод, не требующий сложного и дорогостоящего вакуумного и высокотемпературного оборудования.

Целью настоящей работы являлось прогнозирование условий химического осаждения сульфида цинка в реакционных системах $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--CH}_3\text{CSNH}_2$ и тиомочевины $\text{ZnCl}_2\text{--NH}_4\text{OH--N}_2\text{H}_4\text{CS}$.

Процесс образования сульфида цинка при использовании его растворимой соли и халькогенизатора (тиомочевины $\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}$ и тиацетамида CH_3CSNH_2) можно записать следующим образом:



Для определения минимально необходимой концентрации соли цинка, обеспечивающей образование твердой фазы ZnS в изучаемых реакционных системах, использовали следующие выражения:

$$pC_H = \frac{1}{2} p\text{PP}_{\text{ZnS}} - p\alpha_{\text{Zn}^{2+}} - \left(pk_{\text{H}_2\text{S}}^{1,2} + \frac{1}{3} (pK_c - pK_w - 2pH + p[\text{CH}_3\text{CSNH}_2]_{\text{H}} + p\beta_{\text{HAc}} + p\beta_{\text{NH}_3} - 2p\beta_s) \right);$$

$$pC_H = p\text{PP}_{\text{ZnS}} - p\alpha_{\text{Zn}^{2+}} - \left(pk_{\text{H}_2\text{S}} - 2pH + 0,5pK_c + p[\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}]_{\text{H}} + 0,5p\frac{\beta_{\text{H}}}{\beta_s} \right).$$

где p — показатель (отрицательный десятичный логарифм); C_H — минимальная концентрация соли цинка, необходимая для образования твердой фазы ZnS; PP_{ZnS} — произведение растворимости сульфида цинка ($p\text{PP}_{\text{ZnS}} = 23,80$); $\alpha_{\text{Zn}^{2+}}$ — долевая концентрация свободных ионов металла, способных вступать в химическую реакцию; $k_{\text{H}_2\text{S}}$ — константа ионизации сероводорода, одного из продуктов разложения тиакарбамида ($p k_{\text{H}_2\text{S}} = 19,88$); K_c — константа гидролитического разложения тиакарбамида ($p K_c = 22,48$), тиацетамида ($p K_c = 6,0$); $[\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}]_{\text{H}}$ — начальная концентрация халькогенизатора (тиокарба-

мида) в растворе, 0,6 моль/л; $[\text{CH}_3\text{CSNH}_2]_{\text{H}}$ — начальная концентрация тиоацетамида, 0,05 моль/л; величины β_s и $\beta_{\text{ц}}$, равны:

$$\beta_s = [\text{H}_3\text{O}^+]^2 + k_{\text{HS}^-} [\text{H}_3\text{O}^+] + k_{\text{H}_2\text{S}};$$

$$\beta_{\text{ц}} = [\text{H}_3\text{O}^+]^2 + k_{\text{HCN}_2^-} [\text{H}_3\text{O}^+] + k_{\text{H}_2\text{CN}_2},$$

где k_{HS^-} и $k_{\text{HCN}_2^-}$ — константы ионизации сероводородной кислоты и цианамида по первой ступени ($pK_{\text{HS}^-} = 6,99$; $pK_{\text{HCN}_2^-} = 10,33$); $k_{\text{H}_2\text{CN}_2}^{1,2}$ — суммарная константа разложения цианамида по двум ступеням ($pK_{\text{H}_2\text{CN}_2}^{1,2} = 21,52$) и сероводорода ($pK_{\text{H}_2\text{S}}^{1,2} = 19,88$); pK_{HAc} , pK_{NH_3} — показатели констант диссоциации уксусной кислоты и водного раствора аммиака, соответственно 4,76 и 4,75.

Минимальную концентрацию соли цинка $pC_{\text{н}}$, обеспечивающую образование фазы его гидроксида, определяли по формуле:

$$pC_{\text{н}} = p\text{PP}_{\text{Zn(OH)}_2} - p\alpha_{\text{Zn}^{2+}} - 2pK_{\text{w}} + 2pH_{\text{н}},$$

где $p\text{PP}_{\text{Zn(OH)}_2}$ — показатель произведения растворимости гидроксида цинка (17,15); K_{w} — ионное произведение воды.

Результаты расчетов граничных условий образования ZnS и Zn(OH)_2 в обсуждаемых реакционных системах в виде трехмерных графических зависимостей в координатах «Показатель начальной концентрации соли металла $pC_{\text{н}}$ — концентрация вводимого лиганда $[\text{NH}_3]$ — $p\text{H}$ » раствора приведены на рис. 1.

Концентрационная область, расположенная между поверхностями ZnS и Zn(OH)_2 , соответствует образованию основной фазы — сульфида цинка, ниже плоскости поверхности, ответственной за образование гидроксида цинка слой сульфида цинка будет содержать примесную фазу Zn(OH)_2 .

Согласно термодинамическому расчету установлено, что при содержании в реакционной ванне от 2 до 5 М водного раствора аммиака сульфид цинка, образующийся в системе $\text{ZnCl}_2\text{—NH}_3\text{—CH}_3\text{CSNH}_2$, не будет содержать примесную фазу Zn(OH)_2 в интервале $p\text{H}$ 8,5–11,5 (рис. 1, а).

Из представленных результатов видно, что беспримесная твердая фаза ZnS при осаждении тиомочевинной (рис. 1, б) потенциально образуется в диапазоне $p\text{H}$ от 12,0 до 14,0. Однако область образования сульфида металла значительно меньше, чем при использовании тиоацетамида.

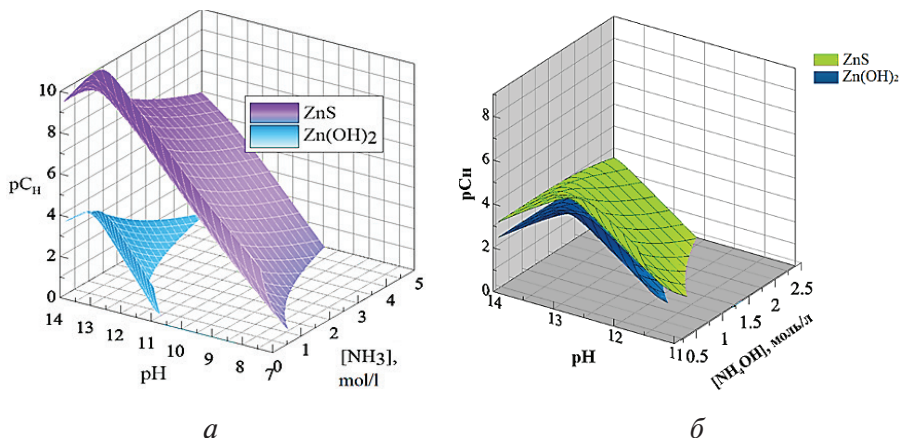


Рис. 1. Граничные условия образования твердых фаз ZnS и Zn(OH)_2 в реакционных системах:

$a - \text{ZnCl}_2\text{--NH}_3\text{--CH}_3\text{CSNH}_2$; $b - \text{ZnCl}_2\text{--NH}_3\text{--N}_2\text{H}_4\text{CS}$
(расчет проведен при температуре 298 K)

Таким образом, определены концентрационные области и граничные условия образования твердой фазы ZnS , а также оценена возможность образования примесной фазы — гидроксида Zn(OH)_2 . Для получения беспримесного сульфида цинка наиболее перспективен тиоацетамид в качестве халькогенизатора. Формирование тонкопленочного ZnS определяется основными параметрами системы: pH среды, концентрацией халькогенизатора, начальным содержанием соли металла и лиганда, а также устойчивостью комплексных форм цинка.

Список источников

1. Reflection optimization for alternative thin-film photovoltaics / J. Mann [et al.] // J. Photovoltaics. 2013. Vol. 3, no.1. P. 472–475.
2. Optimization of zinc sulfide (ZnS) electron affinity in copper indium sulfide (CIS) based photovoltaic cell / H. Ramli [et al.] // Chalcogenide Lett. 2013. Vol. 10, no. 6. P. 189–195.

УДК 544.236.2

ВЛИЯНИЕ SiO_2 НА ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМОФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ

Р. Р. Галиев¹, С. В. Першина², С. Г. Власова³

^{1,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

^{1,2} Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

¹ leosultanov@yandex.ru

Аннотация. В работе исследованы термические свойства стекол $70\text{WO}_3-x\text{SiO}_2-(100-x)\text{P}_2\text{O}_5$ при $x = 0, 10, 15$ мол. % методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Аморфное состояние полученных образцов контролировали с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Установлено, что введение оксида кремния увеличивает склонность вольфрамфосфатных стекол к кристаллизации.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, полностью твердофазные источники тока, вольфрамфосфатные стекла, ДСК

Благодарности. Исследования частично выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН.

INFLUENCE OF SiO_2 ON THERMAL PROPERTIES OF TUNGSTEN-PHOSPHATE GLASSES

R. R. Galiev¹, S. V. Pershina², S. G. Vlasova³

^{1,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

^{1,2} Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS,
Ekaterinburg, Russia

¹ leosultanov@yandex.ru

Abstract. In this work, the thermal properties of $70\text{WO}_3-x\text{SiO}_2-(100-x)\text{P}_2\text{O}_5$ glasses at $x = 0, 10, 15$ mol. % were studied by the DSC. The amorphous state of

the obtained samples was monitored using XRD. It was found that the SiO_2 addition increases the tendency of tungsten-phosphate glasses to crystallize.

Keywords: renewable energy, all-solid-state battery, tungsten-phosphate glasses

Acknowledgments. This research partially was performed using the equipment of the Shared Access Centre “Composition of compounds” of the Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS.

В настоящее время стекла на основе WO_3 вызывают значительный научный и общественный интерес в качестве электродных материалов для литий- и натрий-ионных аккумуляторов, а также как перспективные материалы для электрических коммутационных устройств, элементов электронных схем и газовых датчиков, электрохромных материалов для «умных окон» [1–3]. Вольфрамфосфатные стекла, содержащие до 75 мол. % WO_3 , обладают повышенной термической стабильностью и имеют высокую электронную проводимость при 25 °C ($\sim 10^{-7}$ См/см). Введение оксида кремния увеличивает электропроводность вольфрамфосфатных стекол [4]. Однако в источниках отсутствуют сведения о термическом поведении стекол системы $\text{WO}_3\text{--SiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$. Для снятия микронапряжений, возникающих после закалки расплава, рекомендуется отжигать стекла на 10–30 °C ниже температуры стеклования (T_g). Именно поэтому важно определить характеристические температуры исследуемых стекол. Цель настоящей работы — исследовать термические свойства перспективных вольфрамфосфатных стекол, допированных оксидом кремния.

Стекла состава $70\text{WO}_3\text{--}30\text{P}_2\text{O}_5$, $70\text{WO}_3\text{--}10\text{SiO}_2\text{--}20\text{P}_2\text{O}_5$ и $70\text{WO}_3\text{--}15\text{SiO}_2\text{--}15\text{P}_2\text{O}_5$ были получены методом закаливания расплава в атмосфере воздуха. Исходными компонентами служили WO_3 (х. ч.), SiO_2 (х. ч.) и $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ч. д. а.). Их тщательно смешивали в соответствующих пропорциях, ступенчато нагревали до 500 °C с выдержкой 1 ч для удаления летучих компонентов, после чего плавил при температуре 1250 °C в течение 3,5 ч в платиновом тигле в муфельной печи. Расплав отливали на стальную пластину и придавливали другой такой же пластиной. Скорость охлаждения составляла 10⁵ °C/с. Все полученные материалы были черного цвета и имели стеклянный блеск.

Аморфное состояние полученных стекол контролировали с помощью рентгенофазового анализа (РФА), проводимого на дифрактоме-

тре Rigaku D-MAX-2200V, Cu K_α -излучение в интервале углов рассеяния 2θ от 15 до 70°. На их порошковых рентгенограммах отсутствовали пики кристаллических включений.

Термическое поведение стекол исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в платиновых тиглях на термоанализаторе STA 449C Jupiter (Netzsch) при температурах от 35 до 900 °С. Скорость продувки ячейки воздухом составляла 20 мл/мин.

На рис. 1 показаны данные ДСК, согласно которым стекла при $x = 10$ и 15 мол. % SiO_2 ступенчато кристаллизуются выше T_g в отличие от стекла состава $70\text{WO}_3\text{--}30\text{P}_2\text{O}_5$, которое не кристаллизуется во всем исследуемом температурном диапазоне.

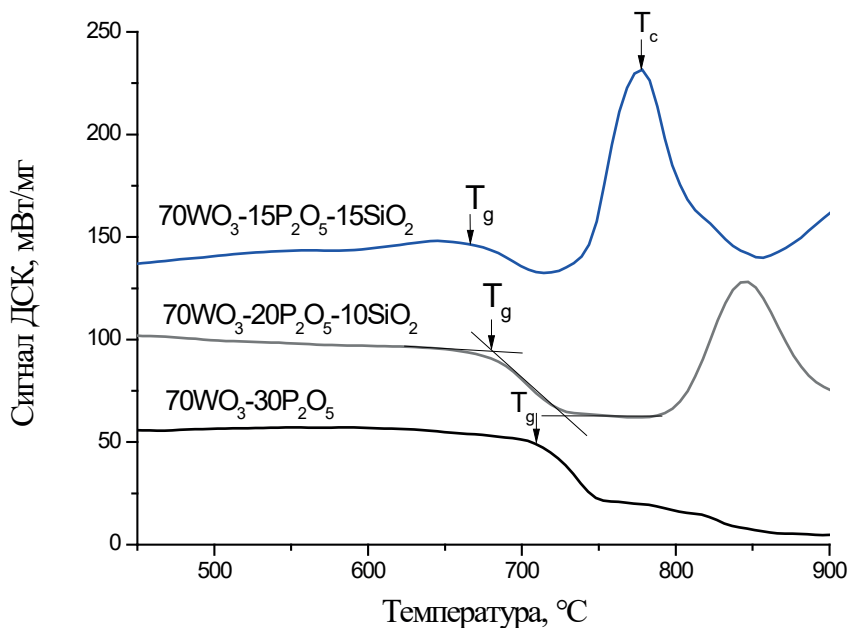


Рис. 1. Кривые ДСК вольфрамо-силикофосфатных стекол

Было установлено, что с ростом содержания SiO_2 температуры стеклования и кристаллизации (T_c) образцов уменьшаются. Как видно из таблицы, термическая стабильность стекол, определяемая по разности температур ($T_c - T_g$), уменьшается с ростом содержания стеклообразующего оксида SiO_2 .

Таблица

Характеристические температуры и термическая стабильность (T_c-T_g) стекол на основе системы $\text{WO}_3\text{--P}_2\text{O}_5$

Состав	T_g , °C	T_c , °C	T_c-T_g , °C
$70\text{WO}_3\text{--}30\text{P}_2\text{O}_5$	709,2	—	—
$70\text{WO}_3\text{--}20\text{P}_2\text{O}_5\text{--}10\text{SiO}_2$	680,5	845	165,5
$70\text{WO}_3\text{--}15\text{P}_2\text{O}_5\text{--}15\text{SiO}_2$	669,4	777	108,4

Стоит отметить, что в исследуемых кремнийсодержащих составах два атома фосфора замещаются на один атом кремния без учета их мольных долей. Таким образом, суммарное количество стеклообразователей в системе уменьшается и, следовательно, доля WO_3 в стекле при пересчете на 100 % увеличивается. Рост содержания оксида вольфрама в стеклах на основе системы $\text{WO}_3\text{--P}_2\text{O}_5$ приводит к снижению T_g , T_c и термической стабильности [5]. Уменьшение температур стеклования и кристаллизации исследуемых нами стекол, допированных оксидом кремния, связано с увеличением истинной доли оксида вольфрама в стекле.

Список источников

1. Levy M., Souquet J. L. Amorphous and vitreous materials as electrodes in electrochemical cells // Materials Chemistry and Physics. 1989. Vol. 23, iss. 1–2. P. 171–188.
2. DC electrical conductivity in mixed transition metal ions doped borate glasses / G. Rajashekara [et al.] // J. Non-Cryst. Solids. 2018. Vol. 481. P. 289–294.
3. Preparation and characterization of $\text{SnO--P}_2\text{O}_5$ glasses as anode materials for lithium secondary batteries / A. Hayashi [et al.] // J. Non-Cryst. Solids. 2004. Vol. 345–346. P. 478–483.
4. Caley R. H., Murthy M. K. Electrical Conductivity of Glasses in the Systems $\text{P}_4\text{O}_{10}\text{--V}_2\text{O}_5$ and $\text{P}_4\text{O}_{10}\text{--WO}_3$ // J. Amer. Cer. Soc. 1970. Vol. 53. P. 254–257.
5. Pershina S. V., Antonov B. D. Synthesis of tungsten phosphate glasses and study of their thermal properties // Russ. J. Appl. Chem. 2018. Vol. 91. P. 167–170.

УДК 544.6.018.462.4

ВЛИЯНИЕ B_2O_3 НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИКИ $Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3$

М. Ю. Галиева¹, С. В. Першина², С. Г. Власова³

^{1,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

^{1,2} Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

¹ dzuba.mari@yandex.ru

Аннотация. В работе исследованы твердые электролиты серии $Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3-xB_2O_3$ ($x = 0...0,20$ мас. %), полученные методом направленной кристаллизации стекла. Согласно данным рентгенофлуоресцентного анализа все полученные образцы были однофазными со структурой NASICON с пространственной группой $R-3c$. Установлено, что наибольшей литий-ионной проводимостью обладает состав $Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3-0,05B_2O_3$, которая составляет $5,06 \cdot 10^{-4}$ См/см при 25 °С.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, полностью твердофазные источники тока, твердый электролит, структура NASICON, стекло-керамика

Благодарности. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН; при финансовой поддержке РФФИ и Свердловской области (проект № 20-43-660015).

IMPACT OF B_2O_3 ADDITION ON THE PHASE COMPOSITION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3$ GLASS-CERAMICS

M. Yu. Galieva¹, S. V. Pershina², S. G. Vlasova³

^{1,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

^{1,2} Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS,
Ekaterinburg, Russia

¹ dzuba.mari@yandex.ru

Abstract. In this work, the solid electrolytes of series $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3-x\text{B}_2\text{O}_3$ ($x = 0 \dots 0,20$ wt. %), which obtained by glass crystallization, were investigated. According to XRD data, all the samples were single-phase with the NASICON structure (R-3c space group). It was found that the $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3-0,05\text{B}_2\text{O}_3$ composition has the highest lithium-ion conductivity, which is $5,06 \cdot 10^{-4}$ S/cm at 25 °C.

Keywords: renewable energy, all-solid-state battery, solid electrolyte, NASICON structure, glass-ceramics

Acknowledgments. This research partially was performed using the equipment of the Shared Access Centre “Composition of compounds” of the Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS; was supported by RFBR and Sverdlovsk Oblast (No. 20–43–660015).

Литий-ионные аккумуляторы являются основными источниками энергии для портативной электроники и электромобилей. Решить проблему безопасности, которая возникает при использовании жидких электролитов, можно путем их замены на твердый электролит [1]. Однако использование негорючих твердых электролитов в полностью твердофазных источниках тока лимитирует более низкая литий-ионная проводимость по сравнению с жидкими электролитами и высокое поляризационное сопротивление на границе с электродными материалами [1]. Известно, что твердые электролиты со структурой NASICON на основе $\text{LiGe}_2(\text{PO}_4)_3$ имеют высокую электропроводность при частичном замещении ионов Ge^{4+} на трехвалентные ионы, в частности Al^{3+} , La^{3+} , Ga^{3+} и Y^{3+} [2–4]. Так, проводимость электролита состава $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ (сокращенно LAGP) составляет $10^{-4} \dots 10^{-5}$ См/см при 25 °C в зависимости от способа синтеза [1–4]. Наибольшая проводимость достигается путем получения электролита стеклокерамическим способом [3; 4]. Дальнейшее увеличение проводимости стеклокерамики LAGP возможно путем введения низкоплавких добавок [5]. В настоящей работе изучено влияние B_2O_3 на фазовый состав и электропроводность стеклокерамики LAGP.

Твердые электролиты состава $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3-x\text{B}_2\text{O}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$ мас. %) были получены методом направленной кристаллизации стекла. Стекло было получено методом закаливания расплава. Исходными реактивами служили Li_2CO_3 (х. ч.), Al_2O_3 (х. ч.), GeO_2 (х. ч.), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ч. д. а.) и H_3BO_3 (ч. д. а.). Их в заданных стехиометрических количествах смешивали и медленно нагревали до 500 °C, а затем плавил при 1450 °C в течение 1 ч в платиновом тигле. Расплав закаливали между двумя стальными пластинами на воздухе. Затем об-

разцы в виде плоскопараллельных пластинок отжигали при 500 °С для снятия микронапряжений. Все полученные образцы стекол кристаллизовали в муфельной печи при одинаковых условиях: 820 °С в течение 2 ч со скоростью 3 °С/мин. Фазовый состав образцов определен с помощью рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре Rigaku D/MAX-2200VL/PC (Rigaku, Япония) в интервале углов 2θ от 10 до 60° при комнатной температуре. На рис. 1 показаны рентгенограммы стеклокерамики $\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{0,5}\text{Ge}_{1,5}(\text{PO}_4)_3-x\text{B}_2\text{O}_3$. Согласно результатам РФА все исследуемые составы являются однофазными с гексагональной структурой с пространственной группой $R-3c$ ($\text{LiGe}_2(\text{PO}_4)_3$, JCPDS 80–1924).

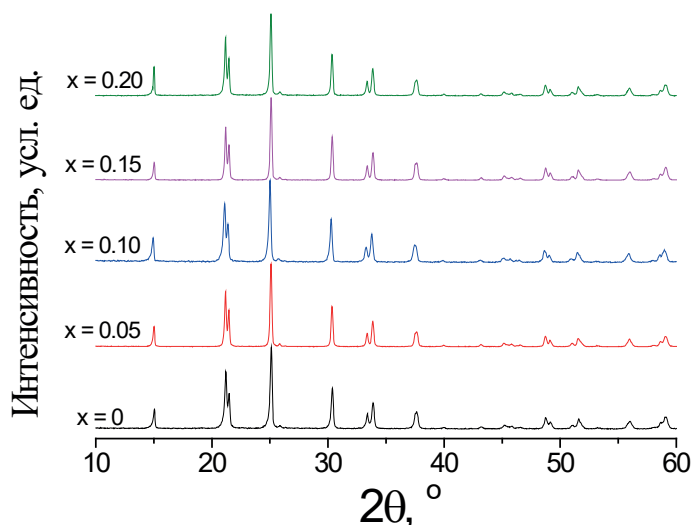


Рис. 1. Рентгенограммы стеклокерамики $\text{LAGP}-x\text{B}_2\text{O}_3$

Литий-ионная проводимость образцов изучена с помощью электрохимического импеданса в диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц в температурном диапазоне 25...125 °С на потенциостате Р-5Х (Ellins, Россия). По обработке спектров импеданса при температурах, выше комнатной, невозможно корректно определить сопротивление объема зерен, поэтому было найдено общее сопротивление образцов и с учетом их геометрии удельная общая проводимость. В исследуемом температурном диапазоне зависимость проводимости от обратной температуры подчиняется уравнению Аррениуса. Обнаружено, что введение 0,05 мас. % B_2O_3 приводит к незначительному увеличению электро-

проводности LAGP в области комнатных температур от $5,03 \cdot 10^{-4}$ до $5,06 \cdot 10^{-4}$ См/см, а дальнейшее допирование снижает проводимость. При этом энергия активации проводимости закономерно снижается с ростом содержания добавки от 34,9 ($x = 0$) до 33,5 кДж/моль ($x = 0,20$), что должно оказывать благоприятное влияние на проводимость во всем исследуемом концентрационном диапазоне. Снижение проводимости стеклокерамики при $x > 0,05$ может быть связано со структурными изменениями, которые необходимо дополнительно исследовать.

Список источников

1. Recent advancements in Li-ion conductors for all-solid-state li-ion batteries // ACS Energy Lett. 2017. Vol. 2 (12). P. 2734–2751.
2. Li S.-C., Cai J.-Y., Lin Z.-X. Phase relationships and electrical conductivity of $\text{Li}_{1+x}\text{Ge}_{2-x}\text{Al}_x\text{P}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Li}_{1+x}\text{Ge}_{2-x}\text{Cr}_x\text{P}_3\text{O}_{12}$ systems // Solid State Ionics. 1988. Vol. 28–30, Part 2. P. 1265–1270.
3. Fu J. Effects of M^{3+} Ions on the Conductivity of Glasses and Glass-Ceramics in the System $\text{Li}_2\text{O}-\text{M}_2\text{O}_3-\text{GeO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ ($\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}, \text{Y}, \text{Dy}, \text{Gd}$, and La) // J. Am. Ceram. Soc. 2004. Vol. 83. P. 1004–1006.
4. Glass-ceramics in $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ge}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ system: the effect of Al_2O_3 addition on microstructure, structure and electrical properties / S. V. Pershina [et al.] // J. Alloys and Compounds. 2020. Vol. 835. P. 155281.
5. Influence of B_2O_3 addition on the ionic conductivity of $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ glass ceramics / H. S. Jadhav [et al.] // J. Power Sources. 2013. Vol. 241. P. 502–508.

УДК 544.654.2*

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ КРЕМНИЯ ИЗ РАСПЛАВА $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$

Т. А. Гевел¹, С. И. Жук², А. Е. Вахромеева³, А. В. Суздальцев⁴, Ю. П. Зайков⁵

^{1,2,3,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Timofey.Gevel@at.urfu.ru

Аннотация. В системе $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$ изучена кинетика электровыделения кремния на стеклоуглероде при температуре 790 °С. В результате анализа полученных экспериментальных данных сделаны выводы о стадийности и лимитирующей стадии процесс, а также получены осадки кремния различной морфологии.

Ключевые слова: кремний, галогенидный расплав, электрохимический анализ, K_2SiF_6 , электролиз

Благодарности. Работа выполнена в рамках соглашения № 075-03-2020-582/1 от 18.02.2020 (номер темы 0836–2020–0037).

SILICON ELECTRODEPOSITION FROM THE $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$ MELT

T. A. Gevel¹, S. I. Zhuk², A. E. Vakhromeeva³, A. V. Suzdaltsev⁴, Yu. P. Zaikov⁵

^{1,2,3,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Timofey.Gevel@at.urfu.ru

Abstract. In the $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$ system, the kinetics of silicon electrowinning on glassy carbon at a temperature of 790 °C was studied. As a result of the analysis of the obtained experimental data, conclusions were drawn about the staging and limiting stage of the process. In addition, sediments of various morphologies were obtained.

Keywords: silicon, halide melt, electrochemical analysis, K_2SiF_6 , electrowinning

Acknowledgements. The research was carried out within the agreement No. 075-03-2020-582/1 (No. 0836-2020-0037).

В настоящее время кремний находит все большее применение при разработке литий-ионных аккумуляторов и солнечных батарей

с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Реализованные в промышленных масштабах способы характеризуются получением кремния ограниченного диапазона размеров и структур, в то время как улучшение характеристик вышеуказанных электрохимических устройств и солнечных батарей основано на использовании кремния с новыми структурными особенностями и повышенной чистотой.

Перспективными представляются способы электролитического получения кремния с управляемыми размерами и морфологией из расплавленных солей. Известны способы получения микро- и наноразмерных осадков кремния из расплавленных солей в широком диапазоне температур (500–1400 °C) с применением в качестве источника кремния коммерческого кремния, K_2SiF_6 , $SiCl_4$, а также SiO_2 [1–3]. Несмотря на это оптимизация разрабатываемых и поиск новых способов получения кремния остается актуальным.

В настоящей работе изучена кинетика электровыделения кремния и проведены электролизные испытания по получению сплошных и волокнистых субмикронных осадков кремния из расплава KCl с добавками до 5 мас. % K_2SiF_6 при температуре 790 °C.

Кинетику электровыделения кремния изучали методами циклической, квадратно-волновой вольтамперометрии и хроноамперометрии с использованием PGSTAT AutoLAB 302N (The Metrohm, Нидерланды). Измерения проводили в трехэлектродной ячейке, размещенной в кварцевой реторте с атмосферой аргона. Рабочим электродом служили стеклоуглеродные стержни, противоэлектродом и квазиэлектродом сравнения — кремний.

На рис. 1 приведены поляризационные зависимости, характеризующие кинетику и некоторые особенности механизма электровыделения кремния из исследуемого расплава. Из анализа полученных зависимостей следует, что процесс электровыделения кремния является электрохимически обратимым и в условиях эксперимента протекает в одну 4-х электронную стадию. Процесс контролируется диффузией в отсутствии затруднений, связанных с зарождением новой фазы.

На основании электрохимических измерений выбраны параметры и проведено электроосаждение кремния на стеклоуглеродной подложке. В результате были получены сплошные осадки кремния, а также осадки развитой структуры со средним размером частиц 200–300 нм (рис. 2).

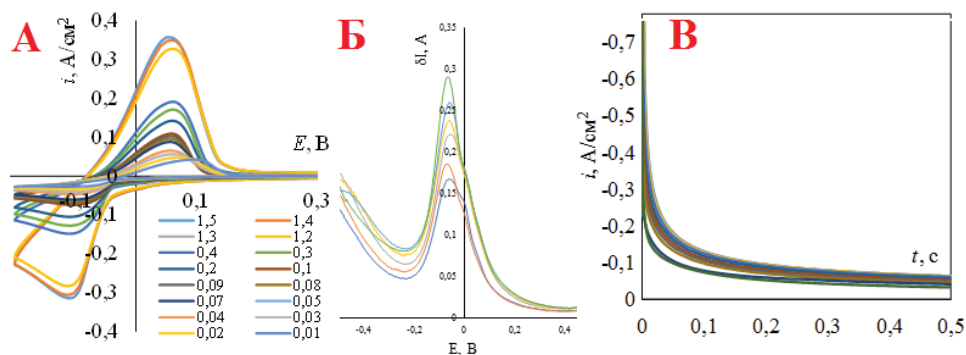


Рис. 1. Поляризационные зависимости, полученные на стеклогуглероде в расплаве KCl с добавкой 5 мас. % K_2SiF_6 при температуре 790 °C методами циклической вольтамперометрии (а), квадратно-волновой вольтамперометрии (б) и хроноамперометрии (в)



Рис. 2. Фотографии сплошного (а) и субмикронного (б) осадков кремния, полученных на стеклогуглероде из расплавов KCl– K_2SiF_6 при температуре 790 °C

Результаты указывают на перспективность получения кремния из расплавов KCl– K_2SiF_6 .

Список источников

1. Электроосаждение кремния из расплава KF–KCl–KI– K_2SiF_6 / Ю. П. Зайков [и др.] // Расплавы. 2016. № 5. С. 441–454.
2. Juzeliunas E., Fray D. J. Silicon electrochemistry in molten salts // Chemical Reviews. 2020. Vol. 120, iss. 3. P. 1690–1709.
3. Получение кремния электролизом галогенидных и оксидно-галогенидных расплавов / Ю. П. Зайков [и др.] // Цветные металлы. 2013. № 2. С. 58–62.

УДК 621.5

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е. А. Зыков¹, А. И. Вальцева², Н. В. Вальцев³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ zikovjenia27@gmail.com

Аннотация. В статье представлены основные моменты истории, потенциал и перспективы развития геотермальной энергетики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, геотермальная энергетика, геотермальные источники энергии

GEOHERMAL ENERGY: HISTORY AND DEVELOPMENT PROSPECTS

E. A. Zikov¹, A. I. Valtseva², N. V. Valtsev³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ zikovjenia27@gmail.com

Abstract. The article presents the main points of history, potential and prospects for the development of geothermal energy.

Keywords: renewable energy sources, geothermal energy, geothermal energy sources

Постоянный рост энергопотребления, истощение ресурсов, экологические проблемы и многие другие факторы стимулируют специалистов всего мира к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). При этом у человечества имеется перспективный, почти неиссякаемый источник энергии, находящийся прямо под нашими ногами, и это геотермальная энергия.

Геотермальная энергетика — направление энергетики, основанное на использовании тепловой энергии недр Земли для производства электрической энергии на геотермальных электростанциях, или непосредственно для отопления, или горячего водоснабжения.

Геотермальная энергетика зародилась относительно недавно: в 1892 г. в США термальные воды впервые были использованы для местного отопления, а в 1911 г. в Италии была построена первая в мире геотермальная электростанция. Сегодня примерно 27 стран производят электричество при помощи геотермальной энергии, однако согласно статистике Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) это составляет лишь один процент (в 2018 г. — 83 ТВт · ч, в 2020 г. — 88 ТВт · ч) от всего объема энергии, производимой возобновляемыми источниками [1; 2]. Ветровые турбины производят в 16 раз больше энергии, а гидроэлектростанции — в 69 раз [3]. Стоит ли уделять внимание источнику энергии с такими невысоким результатом на общем фоне? Определенно стоит, ведь геотермальная энергия имеет огромный потенциал [4].

Всего различают пять типов источников геотермальной энергии: 1) сухой пар; 2) влажный пар; 3) геотермальные воды; 4) сухие горячие каменные породы, разогретые магмой; 5) магма.

Существует три метода преобразования геотермальной энергии в электричество. Это обусловлено двумя факторами: состоянием среды (вода или пар) и температурой породы [5]. Первый метод, или прямой метод, заключается в том, что электростанция работает на сухом пару. Пар поступает непосредственно в турбину, которая вращает генератор, производящий электроэнергию. Использование пара позволяет отказаться от сжигания ископаемого топлива (также отпадает необходимость в транспортировке и хранении топлива). Это старейшие геотермальные электростанции. Паровая технология используется на электростанции «Гейзерс» в Северной Калифорнии, самой крупной геотермальной электростанции в мире.

Второй метод, или непрямой метод, — использование водяного пара. Температура воды должна быть выше 180 °С, чтобы под собственным давлением поступать вверх через скважину. Хотя это более низкая температура, чем у сухих паровых установок. Когда давление уменьшается, часть воды «вспыхивает» в виде пара, который проходит через секцию турбины. Оставшаяся вода, которая не стала паром, возвращается обратно в скважину и может также использоваться для отопления. Стоимость этих систем увеличивается из-за более сложных механизмов, однако они все еще могут конкурировать с обычными источниками питания. Немало примеров таких станций есть в Исландии.

Смешанный тип, третий метод, заключается в использовании воды умеренной температуры используется для получения энергии. Горячая геотермальная вода и вторая, дополнительная жидкость с более низкой точкой кипения, чем у воды, пропускаются через теплообменник. Тепло геотермальной воды выпаривает вторую жидкость, пары которой приводят в действие турбины [6].

Геотермальные станции имеют ряд преимуществ. Относительная экологическая чистота — в отличие от угольных электростанций на геотермальных электростанциях используется возобновляемый источник тепла, который имеет постоянный запас. Исследования показали, что в отрасли задействовано всего 6,5 % от общего мирового потенциала, а это означает, что энергии хватит еще на многие годы. Кроме того, количество парникового газа от геотермальных электростанций (ГеоТЭС) составляет всего 5 % от того, что выделяют угольные электростанции. Потенциально ГеоТЭС имеют большую мощность и способны вырабатывать большее количество энергии — они могут весомо помочь в удовлетворении спроса на энергию, который растет с каждым годом как в развитых странах, так и в развивающихся. Стабильные цены обусловлены отсутствием необходимости покупки топлива. Геотермальные установки требуют минимального обслуживания по сравнению с традиционными электростанциями. В отличие от других источников энергии геотермальные станции гарантируют постоянное энергоснабжение вне зависимости от таких внешних факторов, как, например, поставка топлива. Возобновляемый и устойчивый источник — пока земля поддерживает жизнь, геотермальная энергия будет существовать, ГеоТЭС могут работать. Указанные преимущества приводят к тому, что геотермальная энергетика несмотря на свою молодость развивается сейчас во всем мире.

Однако геотермальные станции имеют и недостатки. Жидкости, которые извлекаются из земли в процессе бурения, содержат большое количество токсичных химических веществ, в т. ч. мышьяк и ртуть, а также парниковых газов (таких как сероводород, диоксид углерода, метан, аммиак и радон). Если они неправильно утилизируются или обрабатываются, то могут попасть в атмосферу или просочиться в грунтовые воды и нанести ущерб окружающей среде и здоровью людей. ГеоТЭС также требуют значительных инвестиций. Большая часть этих затрат касается разведки и бурения геотермальных энергетических ресурсов. Исследования показывают, что без тщательного управления геотер-

мальные резервуары могут истощиться. В таких случаях ГеоТЭС станут бесполезными, пока резервуар не восстановится.

Большинство стран, в которых сегодня действуют геотермальные электростанции, расположены вдоль границ тектонических плит, например вдоль западного побережья двух Америк или Восточно-Африканской рифтовой долины (разлома). Однако и другие страны, не обладающие подходящими геологическими особенностями, строят у себя ГеоТЭС, например Германия и Франция. Несмотря на то что европейским специалистам приходится в значительно большей степени уходить вглубь Земли и использовать более сложные технологии, в результате они имеют ценный и конкурентный источник энергии [7].

Сегодня около сотни стран используют геотермальную энергию для отопления и в промышленных процессах, задействующих тепло в больших количествах [7]. Популярный пример такого применения — Исландия, в которой несмотря на суровый арктический климат почти все бассейны расположены под открытым небом; 90 % потребностей страны в отоплении и горячем водоснабжении обеспечивается геотермальной энергетикой. Мощность геотермальных электрических станций Исландии составляет 575 МВт, они покрывают треть всех потребностей страны в электричестве.

Если говорить о потенциале геотермальной энергии, то можно отметить, что общий тепловой баланс первых 10 км земной коры составляет почти $3 \cdot 10^{23}$ ккал, что в тысячи раз превышает теплотворную способность мировых запасов всех видов топлива [8]. Расчеты, произведенные учеными, показывают, что в середине Земли содержится теплоты намного больше, чем ее можно было бы добыть, расщепив в ядерных реакторах все земные запасы урана и тория. Если человечество будет использовать одну только геотермальную энергию, пройдет 41 млн лет, прежде чем температура недр Земли понизится на полградуса [8]. Однако для этого нужен ряд инноваций, одна из которых — получение энергии прямо из магмы, что также решит проблему возможного истощения. Конечно маловероятно, что геотермальная энергетика станет единственной, заменив все остальные, но она определенно займет значимое место в энергетике будущего.

Список источников

1. Renewable energy highlights (2018) [Electronic resource] // IRENA. URL: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Pub->

lication/2018/Jul/IRENA_Renewable_energy_highlights_July_2018.pdf (date of access: 27.10.2020).

2. Renewable energy highlights (2020) [Electronic resource] // IRENA. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/Renewable_energy_highlights_July_2020.pdf (date of access: 27.10.2020).

3. Электричество под ногами [Электронный ресурс] // Энергетика в России и в мире. URL: <https://peretok.ru/articles/freezone/20009/> (дата обращения: 27.10.2020).

4. IRENA (2020), Renewable Energy Statistics 2020, July 2020 [Electronic resource]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2020.pdf (date of access: 27.10.2020).

5. Геотермальные электростанции [Электронный ресурс] // Новая генерация. URL: https://manbw.ru/analytics/geothermal_power_stations_plant.html (дата обращения: 27.10.2020).

6. Геотермальные электростанции: преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. URL: <https://avenston.com/ru/articles/geothermal-pp-pros-cons/> (дата обращения: 27.10.2020).

7. Геотермальная энергетика [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alterenergy.info/home/geotermalnaya-energetika/1890-geotermalnaya-energetika-osnova-energeticheskogo-kompleksa-islandii> (дата обращения: 27.10.2020).

8. Потенциал геотермальной энергетики в мире [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cleandex.ru/articles/2016/03/14/geothermal-energy-global> (дата обращения: 27.10.2020).

УДК 620.9

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ

П. А. Каганер¹, С. Е. Щеклеин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ pashakag@mail.ru

Аннотация. В работе представлено технико-экономическое сравнение различных вариантов компоновки электростанций с использованием фотоэлектрических панелей. Показано, что стоимость электроэнергии, полученной путем использования фотоэлектрических станций совместно с дизельным генератором или с энергосистемой, дешевле, чем стоимость электроэнергии в Москве от централизованного энергоснабжения.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, стоимость электроэнергии

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF OPTIONS OF PHOTOVOLTAIC PLANTS IN CENTRAL RUSSIA

P. A. Kaganer¹, S. E. Shcheklein²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ pashakag@mail.ru

Abstract. The paper presents a technical and economic comparison of various options for the layout of power plants using photovoltaic panels. It is shown that the cost of electricity generated by using photovoltaic stations in conjunction with a diesel generator or with a power system is cheaper than the cost of electricity in Moscow from centralized power supply.

Keywords: photovoltaic station, electricity cost

В настоящее время в отдаленных и труднодоступных регионах России основными источниками энергоснабжения являются дизель-

ные и бензиновые электростанции. Только на Крайнем Севере и территориях, к нему приравненных, их общее число превышает 5 тыс., а ежегодный расход топлива — 6 млн т. В поставках топлива в эти районы занято около 60 тыс. человек. Недостаточное финансирование на фоне ограниченных сроков навигации на северных морских путях приводит к тому, что запасы топлива на электростанциях составляют 40–70 % от нормативных и не могут гарантировать надежность электроснабжения в условиях полярной зимы. Задачу повышения надежности электроснабжения при одновременном сокращении объемов завозимого топлива можно решить путем создания автономных энергокомплексов, использующих органическое топливо и потенциал возобновляемых источников энергии [1].

Одним из таких вариантов является использование станций на дизельном топливе совместно с фотоэлектрическими панелями. Солнечная энергетика обладает большим потенциалом для использования даже в такой северной стране, как Россия [2].

В настоящей работе выполнен расчет фотоэлектрической станции (ФЭС) мощность 3 кВт для размещения в Москве. Географически Москва расположена в средней полосе России, поэтому полученные данные можно также применять и к другим городам, которые относятся к указанной полосе.

Рассмотрены три варианта компоновки электростанции с использованием солнечных панелей: автономная ФЭС, гибридная ФЭС и сетевая ФЭС.

Автономная фотоэлектрическая станция должна иметь аккумуляторные батареи (АКБ) большой емкости из-за сезонных (вызванных вращением Земли вокруг Солнца) и суточных (вызванных вращением Земли вокруг собственной оси) изменений прихода солнечной энергии. Резерв не предусмотрен. Такая система отличается полной независимостью от энергосистемы, отсутствием затрат на топливо, но достаточно высокой стоимостью. На рис. 1 представлена принципиальная схема автономной ФЭС.

Гибридная фотоэлектрическая станция имеет резерв в виде дизельного генератора (ДГ). Такая ФЭС позволяет запастись энергией в период высокого прихода солнечной энергии, а недостаток компенсировать дизельной генерацией. Такое сочетание, с одной стороны, позволяет получить гарантированный резерв, а с другой — сократить время работы ДГ, обеспечив экономию топлива и увеличения периода эксплуатации.

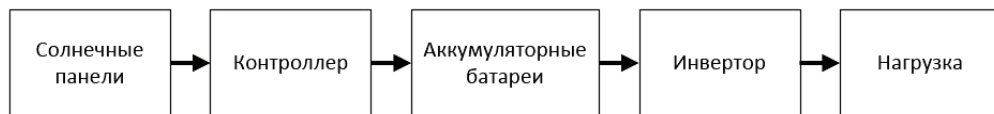


Рис. 1. Принципиальная схема автономной ФЭС

На рис. 2 представлена принципиальная схема гибридной ФЭС.

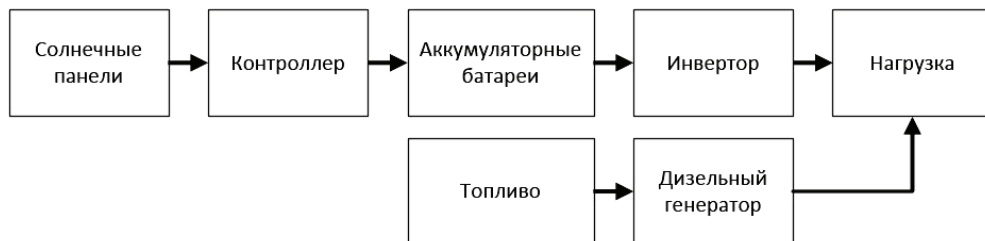


Рис. 2. Принципиальная схема гибридной ФЭС

Сетевая ФЭС работает совместно с энергосистемой, поэтому не нуждается в АКБ. Энергосистема представлена в качестве внешнего аккумулятора: она принимает излишки и компенсирует нехватку электроэнергии. На рис. 3 представлена принципиальная схема сетевой ФЭС.

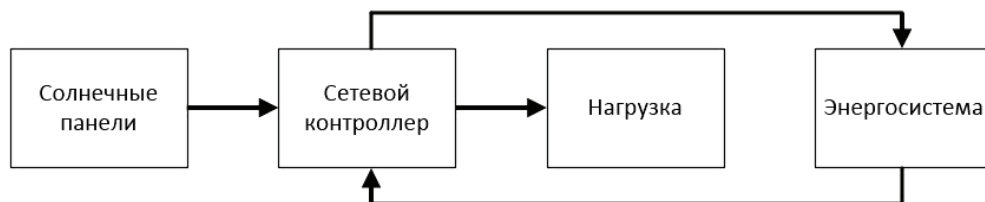


Рис. 3. Принципиальная схема сетевой ФЭС

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой на электростанции, вычислялась по формуле

$$C_{\text{фэс}} = \frac{I_{\text{фэс}}}{W_{\text{фэс}}} p. / (\text{кВт} \cdot \text{ч}),$$

где $I_{\text{фэс}}$ — годовые издержки при использовании, р.; $W_{\text{фэс}}$ — годовая выработка энергии солнечных модулей, кВт · ч.

График стоимости электроэнергии, вырабатываемой на различных видах электростанций, приведен на рис. 4.

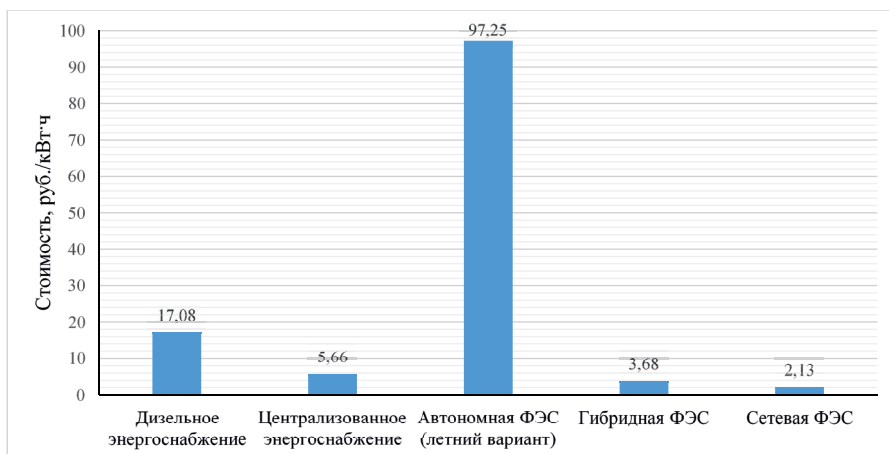


Рис. 4. График стоимости электроэнергии для Москвы

Таким образом, можно сделать вывод, что стоимость электроэнергии, полученной путем использования фотоэлектрических станций совместно с дизельным генератором или с энергосистемой, дешевле, чем стоимость электроэнергии в Москве от централизованного энергоснабжения. Это означает, что во всех городах средней полосы России целесообразно строительство гибридных и сетевых фотоэлектрических станций.

Список источников

1. Велькин В. И., Щелоков Я. М., Щеклеин С. Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение / под общ. ред. В. И. Велькина. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 312 с.
2. Суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности, МДж/м² (территория России) [Электронный ресурс]. URL: <http://alternativenergy.ru/insolaciya.html#1> (дата обращения: 01.12.2020).

УДК 621.3

СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОМА

А. А. Казанцева¹, С. Е. Щеклеин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ anet46061@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрена возможность энергоснабжения частного дома с помощью фотоэлектрической станции. Представлены схемы реализации станций и схема для использования солнечной энергии не только для энергоснабжения, но и для отопления дома. Показано, что для ряда регионов России существуют благоприятные условия для использования солнечных электростанций.

Ключевые слова: энергоснабжение, теплоснабжение, энергопотребление, солнечная энергия, солнечная электростанция

SOLAR POWER PLANT FOR HOME POWER SUPPLY

A. A. Kazantseva¹, S. E. Shcheklein²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ anet46061@yandex.ru

Abstract. The paper considers the possibility of power supply to a private house using a photovoltaic station. Schemes for the implementation of stations and a scheme for using solar energy not only for power supply, but also for heating the house are presented. It is shown that for a number of regions of Russia there are favorable conditions for the use of solar power plants.

Keywords: energy supply, heat supply, energy consumption, solar energy, solar power plant

Автомные энергоустановки являются широко востребованными в различных регионах, где люди проживают вне систем централизованного энергоснабжения. В последнее время все более широкое

применение находят фотоэлектрические энергоустановки, использование которых позволяет отказаться от бензиновых и дизель-генераторов [1; 2]. Дополнительными негативными факторами использования бензиновых и дизель-генераторов являются выбросы продуктов сгорания в окружающую среду и шум.

Такая энергоустановка на основе возобновляемых источников является персональной электростанцией, не зависящей от централизованной сети и имеющая ряд преимуществ:

- 1) большой срок службы оборудования (например, срок службы фотоэлектрических модулей составляет 25 лет);
- 2) экологичность системы;
- 3) возможность расширения системы и наращивания мощности.

Россия, как и другие страны, располагает значительными ресурсами солнечной энергии. На рис. 1 представлена карта распределения поступления солнечной радиации по территории России. Карты построены с использованием результатов многолетних спутниковых наблюдений NASA [3; 4]. Приведенная карта (рис. 1) распределения поступлений солнечной радиации построена для оптимальных углов, соответствующих максимальным годовым суммам солнечной энергии. Следует подчеркнуть, что при этом каждой географической точке соответствует свой оптимальный угол наклона приемника к горизонту.

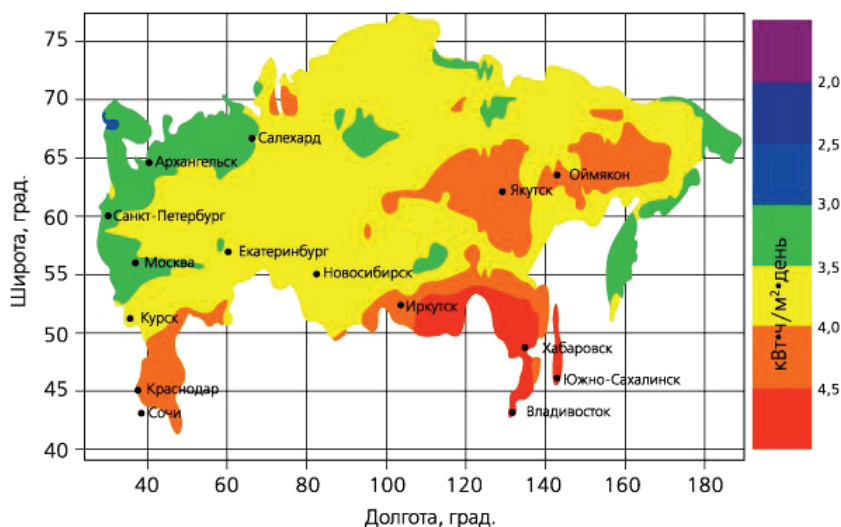


Рис. 1. Среднедневные суммы солнечной радиации за год (оптимально ориентированная поверхность)

С учетом данных метеорологических наблюдений количества дней с различными условиями облачности энергия, приходящая на поверхность солнечного преобразователя за месяц [5]:

$$Q_{\text{прих. мес}} = Q_{\text{прих. ясн}} \cdot (N_{\text{мес}} - N_{\text{обл}}) + Q_{\text{прих. обл}} \cdot N_{\text{обл}},$$

где $Q_{\text{прих. ясн}}$ и $Q_{\text{прих. обл}}$ — значения суммарной радиации, приходящей на поверхность солнечного преобразователя за средний день месяца для условий ясного неба и средних условий облачности; $N_{\text{мес}}$ — количество дней в месяце; $N_{\text{обл}}$ — среднее число пасмурных дней по общей облачности за данный месяц [3; 6].

Рассмотрим возможные схемы реализации фотоэлектрических станций.

Сетевая фотоэлектрическая станция. Принцип работы: выработанная электроэнергия от солнца направляется на нужды потребителя. При этом из внешней (централизованной) сети берется только недостающая мощность. В темное время суток система находится в режиме ожидания. Подходит для потребителя с дневным пиком потребления.

Автономная фотоэлектрическая станция. Принцип работы: выработанная электроэнергия направляется на нужды потребителя, а избытки запасаются в аккумуляторных батареях. В темное время суток энергоснабжение происходит от аккумуляторов.

Гибридная фотоэлектрическая станция. Принцип работы: выработанная в светлое время суток электроэнергия направляется на нужды потребителя, а в темное время суток снабжение потребителя происходит от дизель-генераторов или внешней сети. При отключении внешней сети система работает как автономная.

Использование солнечной энергии для отопления. Солнечные коллекторы являются эффективными устройствами, использующими энергию солнца. В солнечных коллекторах эффективно используется приблизительно 80–95 % поглощенной солнечной энергии.

Система (рис. 2) состоит из коллектора, контура теплообмена и теплового аккумулятора (обычно водяного бака).

По солнечному коллектору происходит циркуляция теплоносителя (жидкости). В нем теплоноситель нагревается от солнечной энергии. Затем воде в баке передают энергию посредством теплообменника, вмонтированного в бак-аккумулятор. В баке нагретая вода хранится вплоть до ее использования, к примеру, на ГВС, отопление, а также другие хозяйственные нужды.

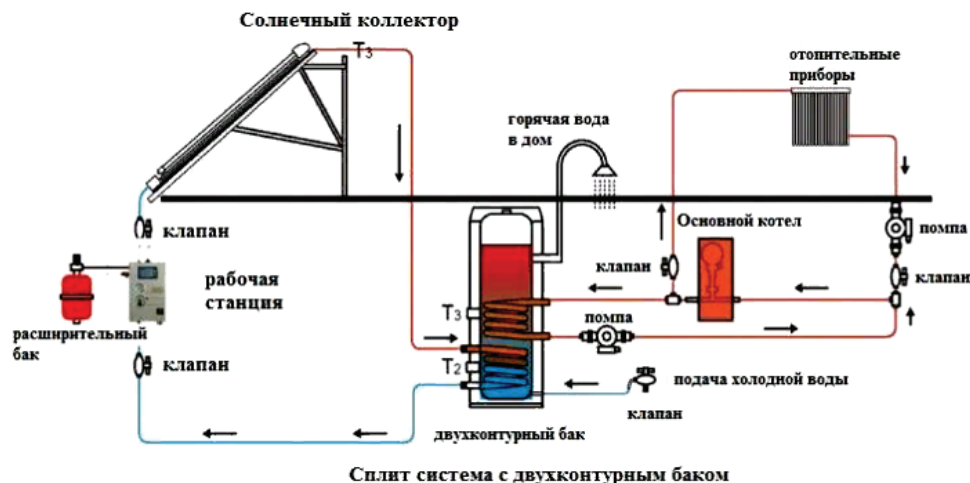


Рис. 2. Коллекторная система

Список источников

1. Велькин В. И. Энергоснабжение удаленного объекта на основе оптимизации кластера ВИЭ. Екатеринбург : УрФУ, 2013. 100 с
2. Щеклеин С. Е., Попов А. И. Надежное энергоснабжение с использованием ВИЭ // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2018. № 6 (198). С. 75–79.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Многолетние данные. М. : Гидрометеиздат, 1990. Ч. 1–6. Вып. 9. 557 с.
4. NASA Surface Meteorology and Solar Energy [Electronic resource] // NASA. URL: <https://asdc.larc.nasa.gov> (date of access: 05.12.2020).
5. Попель О., Прошкина И. Солнечная Россия // В мире науки. 2005. № 1. С. 14–18.
6. Atmospheric Science Data Center (ASDC) [Electronic resource] // NASA. URL: <https://earthdata.nasa.gov/eosdis/daacs> (date of access: 05.12.2020).

УДК 66.074.3

ОЧИСТКА БИОГАЗА С ПОМОЩЬЮ CHLORELLA VULGARIS

**К. К. Климов¹, Е. Ф. Лизунова², Б. Э. Любомудров³,
М. А. Безматерных⁴, М. В. Волкова⁵**

^{1,2,3,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем
и машин» УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹ smaili4ek1998@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме очистки биогаза от CO₂. Проведен анализ перспектив использования микроводоросли *Chlorella vulgaris* как агента в биологическом методе очистки биогаза. Рассмотрена возможность совместной технологии для получения очищенного биогаза и кормовых добавок в виде суспензии микроводорослей как ценных компонентов с точки зрения коммерческой выгоды. Оценен потенциал применения биогаза и факторы, сдерживающие рост биогазовой индустрии в России.

Ключевые слова: углекислый газ, природный газ, биогаз, очистка биогаза, сельское хозяйство, альтернативный источник энергии

BIOGAS PURIFICATION WITH CHLORELLA VULGARIS

**K. K. Klimov¹, E. F. Lizunova², B. E. Lubomudrov³,
M. A. Bezmaternykh⁴, M. V. Volkova⁵**

^{1,2,3,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ Science and Engineering Center “Reliability and Safety of Large Systems
and Machines” of the UB of the RAS, Ekaterinburg, Russia

¹ smaili4ek1998@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to the problem of cleaning biogas from CO₂. A literary analysis of the prospect of using the microalga *Chlorella vulgaris* as an agent in the biological method of biogas purification has been carried out. The possibility of a joint technology for obtaining purified biogas and feed additives in the form of a

suspension of microalgae, as valuable components from the point of view of commercial benefits, is considered. The potential for using biogas and the factors constraining the growth of the biogas industry in Russia are assessed.

Keywords: carbon dioxide, natural gas, biogas, biogas purification, agriculture, alternative energy source

Альтернативные источники энергии все больше привлекают внимание топливно-энергетической промышленности. Одним из наиболее перспективных видов биотоплива является биогаз.

В настоящее время в Китае действует 10 млн фермерских биореакторов. Около двухсот биогазовых установок работают в Австрии, в Германии — почти 10 тыс. [1].

Есть положительные примеры выработки собственной электроэнергии и в российских хозяйствах. Тем не менее в России развитие биогазовой индустрии не так высоко несмотря на хороший потенциал. Одними из наиболее привлекательных с экономической точки зрения источников биогаза являются отходы сельского хозяйства. Кроме того, использование отходов сельского хозяйства может решить сразу две проблемы: утилизацию отходов и получение ценного топлива — биогаза.

Биогаз может использоваться в бытовом секторе, в котором наблюдается преимущественно невысокое потребление газа при его низком давлении [2]. Однако, несмотря на перспективность, кажущуюся простоту и выгодность производства биогаза, есть проблемы, ограничивающие его применение.

Значительное содержание (25–40 %) CO_2 в биогазе влияет на количество требуемого воздуха для полного сгорания топлива [3]. Теплотворная способность биогаза меньше (от 21 до 27,2 МДж/м³), чем у природного газа. Это сказывается на расходе подаваемого топлива [3]. Расчетные характеристики очищенного биогаза до содержания метана 80 % и более соответствуют требованиям, предъявляемым к природным газам (ГОСТ 5542–87). Следовательно, после очистки биогаза можно использовать его, как моторное топливо [4].

Высокая стоимость хранения и транспортировки биогаза связана с невозможностью сжать биогаз до высоких давлений из-за повышенного содержания углекислого газа. Двуокись углерода разбавляет биогаз и вызывает потери при его хранении. По этой причине важно стремиться к высокому содержанию метана и как можно более низкому содержанию двуокиси углерода [5].

Химические методы очистки неприемлемы из-за потребности в большом количестве реагентов и большом выходе отходов реакции, а метод растворения углекислого газа в воде, применяемый промышленно, требует достаточно сложного и дорогого оборудования [2].

Очистка биогаза с использованием водорослей включает использование фотосинтетической способности водорослей. Использование биогаза в качестве источника углекислого газа имеет два основных преимущества: снижаются затраты на производство биомассы и производимая биомасса не содержит вредных соединений. Скорость роста микроводорослей, потребляющих биогаз идентична скорости роста культуры, выращенной на смеси воздуха и пищевого CO_2 [6]. Такая технология, с одной стороны, обеспечивает эффективность и относительную простоту очистки с минимальным количеством затрат, с другой — получение ценного продукта в виде микроводорослей.

Полученные водоросли относительно недороги, потому что выращивание водорослей требует минимального количества питательных веществ [6], а в случае очистки биогаза синтетическая среда для выращивания успешно заменяется на разбавленные перебродившие отходы биогазового производства, при этом полностью утилизируются отходы производства.

Перспективна в изучении микроводоросль *Chlorella vulgaris* — быстрорастущий вид микроводорослей, интересных в отношении производства вторичных метаболитов с полезными для здоровья свойствами. Совсем недавно было также высказано предположение, что она является хорошими кандидатом для производства топлива и очистки биогаза [7].

В последнее время в сельском хозяйстве все чаще встает проблема необходимости внедрения ресурсосберегающих технологий содержания и кормления животных. Одной из них является использование в качестве витаминно-кормовой добавки и профилактического средства против болезней биомассы хлореллы. Введение ее в виде суспензии в рацион скота и птицы позволяет в значительной мере заменить дорогостоящие витаминные и лекарственные препараты [8].

Направлением развития такой перспективной индустрии, как биогазовая, сегодня может стать разработка технологии очистки биогаза с применением микроводорослей, в частности *Chlorella vulgaris*. Такое решение может снизить стоимость и повысить эффективность очистки биогаза от углекислого газа — основной проблемы, ограничиваю-

щей применение биогаза и приводящей к увеличению его стоимости в очищенном виде. Вместе с тем, по нашему мнению, эта технология может рассматриваться как совместная — для получения очищенного биогаза и кормовых добавок в виде суспензии микроводорослей.

Список источников

1. Актуальность применения биогазовых установок в России и за рубежом / Б. Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Казан. ГАУ. 2017. № 2 (44). С. 71–74.
2. Бирюков А. Б., Гнитиёв П. А., Дробышевская И. П. Анализ технологии производства биогаза из органических отходов для замены природного газа // Вестник Донец. нац. техн. ун-та. 2017. № 1 (7). С. 25–31.
3. Жигалов Д. А. Взаимозаменяемость природного газа и биогаза // Современ. науч. исслед. и инновации. 2019. № 5 (97). С. 9.
4. Абдурахманов Д. Р. Обоснование применения биогаза в качестве моторного топлива // Вестник науки. 2020. № 5 (26). С. 88–92.
5. Давронов Ф. Ф., Хужжиев М. Я. Состав и качество биогаза // Вопросы науки и образования. 2018. № 2 (14). С. 24–25.
6. Ramaraj R., Dussadee N. Biological purification processes for biogas using algae cultures: A review // International Journal of Sustainable and Green Energy. 2015. Vol. 4, Iss. 1–1. P. 20–32.
7. Ramaraj R., Unpaprom Y., Dussadee N. Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification // International Journal of New Technology and Research. 2016. Vol. 2, Iss. 3. P. 117–122.
8. Мельников С. С. Мананкина Е. Е. Использование хлореллы в кормлении сельскохозяйственных животных // Наука и инновации. 2010. № 8 (90). С. 40–43.

УДК 628.116

ПРОИЗВОДСТВО ВОДЫ ИЗ ВОЗДУХА

Д. В. Лагунов¹, А. И. Попов²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ dimasik.rts@gmail.com

Аннотация. В работе описано устройство для производства воды из воздуха, с использованием вихревой трубы Ранка — Хирша.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, опреснение, устройство для производства воды из воздуха

PRODUCTION OF WATER FROM AIR

D. V. Lagunov¹, A. I. Popov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ dimasik.rts@gmail.com

Abstract. The paper describes device for the production of water from air, using a Rank — Hirsch vortex tube.

Keywords: renewable energy sources, desalination, device for the production of water from air

Дефицит пресной воды сопровождает человечество на всем пути развития с древнейших времен. От дефицита пресной воды страдает около 40 % населения Земли. Это одна из глобальных проблем человечества.

Пресная вода является ценным природным ресурсом, стоимость которого постоянно растет. Тратится большое количество ресурсов на опреснение и обессоливание, т. к. эти процессы энергоемкие и имеют высокую стоимость.

В наши дни население стремительно растет, и потребность в пресной воде только возрастает.

Одним из перспективных способов получения пресной воды является производство воды из атмосферного воздуха. Характеристики воды, полученной из атмосферы, очень высокие. Она содержит мало токсичных металлов, примерно на 2–3 порядка меньше по сравнению с требованиями санитарных служб. В такой воде практически не существует микроорганизмов, а также конденсат обеднен по содержанию дейтерия (его наличие отрицательно влияет на организм человека) [1].

В истории человечества есть примеры получения воды из воздуха, например колодцы, построенные вдоль Великого шелкового пути. Они были на расстоянии 12–15 км друг от друга вдоль всего пути. Благодаря конструкции колодца через него прокачивался пустынный воздух тысячами кубометров в сутки. У воздуха, проходившего через колодец, отнималась практически вся масса воды [2].

В результате анализа основных проблем известных методов получения пресной воды, таких как энергоемкость и дороговизна, изучения перспективных путей их решения на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета (АСиВИЭ УрФУ) было разработано устройства для производства воды из воздуха [3].

Его основными конструктивными элементами, которые изображены на рис. 1, являются: 1 — источник сжатого воздуха; 2 — регулирующий входной вентиль; 3 — вихревая труба Ранка — Хирша; 4 — проходной вентиль холодного воздуха; 5 — проходной вентиль горячего воздуха; 6 — патрубок ввода холодного воздуха; 7 — патрубок ввода горячего воздуха; 8 — кожухотрубный теплообменник-конденсатор; 9 — выводной патрубок холодного воздуха; 10 — выводной патрубок горячего воздуха; 11 — патрубок для вывода конденсата; 12 и 13 — дополнительные вентили для оптимального режима работы устройства [3].

Необходимо отметить несколько моментов, которые являются важными техническими результатами такого изобретения:

- 1) конструкция получилась простой за счет использования вихревой трубы Ранка — Хирша;
- 2) уменьшение материальных и энергетических затрат привели к низкой стоимости единицы получаемой продукции.

Устройство работает следующим образом. Осуществляется подача сжатого воздуха через регулирующий входной вентиль на вход трубы Ранка — Хирша. На выходе из трубы генерируются потоки горячего и холодного воздуха. С «холодного» выхода вихревой трубы через про-

ходной вентиль поток холодного воздуха подается на патрубок ввода холодного воздуха, проходит через внутреннюю трубу конденсатора, охлаждает их и выходит через патрубок вывода в атмосферу. Одновременно с «горячего» выхода вихревой трубы через проходной вентиль поток горячего воздуха поступает через патрубок ввода горячего воздуха во внутреннее межтрубное пространство конденсатора, омывает трубы горячим воздухом, вызывая на них конденсацию, и выходит через патрубок вывода в атмосферу. Конденсат, скапливающийся на дне конденсатора, удаляется через патрубок для вывода конденсата.

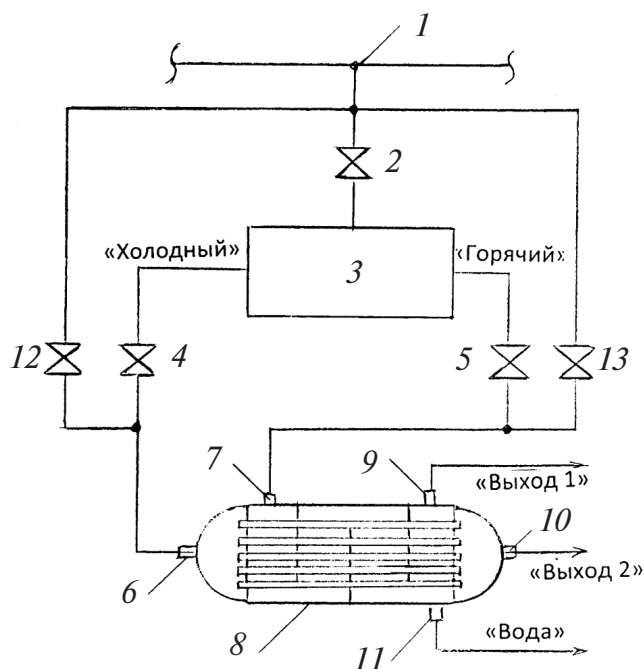


Рис. 1. Основные элементы устройства для производства воды из воздуха

Чтобы создать оптимальный режим работы устройства, целесообразно подмешивать внешний атмосферный воздух, имеющий большой процент влажности. Для этого нужно, контролируя производительность конденсатора, регулировать объемы подачи атмосферного воздуха через дополнительные вентили.

Похожая конструкция устройства для получения воды из воздуха представлена в работе под названием «Способ извлечения воды из воз-

духа, устройство для извлечения воды из воздуха и конденсатор», в которой конструкция имеет блок формирования потока атмосферного воздуха, распылитель воды, блок управления, нагреватель воздуха, а также другие элементы, что делает ее конструктивно сложным и дорогим изделием [4].

Описанное устройство [3] может применяться для массового использования, т. к. оно достаточно простое в эксплуатации и производит воду непосредственно из воздуха с малыми энергетическими затратами. Кроме того, конструкция состоит из унифицированных узлов, выпускаемых промышленностью, а также не требует значительных затрат на изготовление.

Список источников

1. Пресная вода из атмосферы [Электронный ресурс]. URL: https://www.ifspd.ru/portfolio/Fresh_water_from_atmosphere.pdf (дата обращения: 10.12.2020).
2. Колодцы, использующие вихревой эффект [Электронный ресурс]. URL: <https://втораяиндустриализация.рф/kolodtsy-i-ispolzuyushhie-vihrevoi-effekt/> (дата обращения: 10.12.2020).
3. Устройство для производства воды из воздуха : пат. 2689592 Рос. Федерация : МПК С 02 F 1/04 / А. И. Попов ; заявл. 16.04.2018 ; опубл. 28.05.2019, Бюл. № 16.
4. Способ извлечения воды из воздуха, устройство для извлечения воды из воздуха и конденсатор : пат. 2426839 Рос. Федерация : МПК Е 03 В 3/28, В 01 D 5/00 / В.А. Карамзин [и др.] ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23.

УДК 697.329:004.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ИНСОЛЯЦИИ И ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

**Д. Н. Литвинов¹, В. С. Костарев², В. А. Климова³,
В. И. Велькин⁴**

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Росси

¹ dan11.litvinov@ya.ru

Аннотация. В работе описан теплогидравлический расчет плоского солнечного коллектора при помощи CFD в целях анализа процессов теплопередачи между абсорбером перьевого типа и водой, а также изучения влияния погодных условий (таких как скорость ветра) на эффективность работы коллектора. Итогом работы являются полученные картины потоков теплоносителя внутри коллектора, графики распределения температуры и падающего теплового лучистого (солнечного) потока по времени, зависимости перепада температур теплоносителя на входе и выходе из коллектора от времени работы при разных значениях скорости ветра.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, плоский солнечный коллектор, солнечное излучение, потери тепла, конвективный теплообмен

THE USAGE OF CFD-SIMULATION FOR THE ANALYSIS OF THE INSOLATION EFFECT AND WIND LOAD INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF THE SOLAR COLLECTORS

D. N. Litvinov¹, V. S. Kostarev², V. A. Klimova³, V. I. Velkin⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ dan11.litvinov@ya.ru

Abstract. The paper presents the results of a thermohydraulic calculation of a flat solar collector using CFD to analyze heat transfer processes between a feath-

er-type absorber and water and the weather conditions such as wind velocity on the collector operation efficiency. The results of the paper are the figures of the coolant flows inside the collector, the graphs of the temperature distribution, and the incident heat radiant (solar) flux over time and the dependence of the heat carrier temperature difference at the collector inlet and outlet on the operating time for the different values of wind velocity.

Keywords: computational fluid dynamics, flat solar collector, solar radiation, heat loss, convective heat exchange

В настоящий момент рынок солнечных коллекторов стабильно развивается, поскольку солнечные коллекторы являются доступным средством использования возобновляемой энергии солнечного излучения в виде теплоты, передающейся жидкости или воздуху. Количество используемых солнечных коллекторов возрастает с каждым годом, по данным на 2018 г. их суммарная мощность достигла более 480 ГВт [1]. Солнечные коллекторы используют в бытовых и промышленных масштабах как для нагрева воды в домашней системе водоснабжения, так и, например, для нагрева воды бассейна, а также для повышения общей эффективности теплоснабжения [2]. Они неприхотливы в обслуживании, просты в установке, что позволяет значительно снизить удельную стоимость нагретой воды [3].

Преобразование энергии в плоском солнечном коллекторе производится следующим образом: солнечное излучение, проходя через стекло, попадает на поглощающую поверхность с высокой степенью абсорбции, которая преобразует энергию солнечного излучения в тепловую и передает энергию теплоносителю (воде или воздуху), проходящему через трубки прямой или меандровой формы. Для снижения потерь под трубками располагают слой теплоизоляции [4].

Авторами настоящей работы изучались потери солнечного коллектора за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, интенсивность которого во многом зависит от влажности воздуха, скорости ветра и других погодных факторов. Для исследования было проведено моделирование в среде Solidworks Flow Simulation: создана модель солнечного коллектора с произвольно выбранными размерами.

Для анализа работы коллектора создан следующий сценарий работы: подключение и запуск в 9:00 15 июля в Москве при ясном небе

с рассматриваемой длительностью работы 10 ч. На входе в коллектор поступает вода с объемным расходом 30 л/ч. Для моделирования ставилась внешняя задача с включением в расчет внутреннего пространства коллектора. В проекте использовалось три текущих среды: внешняя (воздух), внутри корпуса коллектора (разреженный воздух) и теплоноситель внутри труб (вода).

Солнечный коллектор используется на открытом воздухе, поэтому погодные условия влияют на теплообмен коллектора с окружающей средой. Однако точное моделирование состояния окружающей среды в каждый конкретный момент времени (ветер, облачность) не представляется возможным, поэтому приняты следующие допущения: постоянная температура воздуха, нулевая влажность, ясный день. Для моделирования ветра задавались скорость и направление движения для внешней текучей среды. Скорость изменялась в диапазоне от 0 до 4 м/с с шагом 1 м/с, что соответствует типичным для Москвы значениям скорости ветра. Направление задавалось под углом 45° к поверхности коллектора и оставалось постоянным на протяжении всего расчета.

Тепловой поток за счет солнечной радиации выбирался из встроенной базы данных по географической широте места, дате и времени. Последнее определяет угол падения света.

В ходе расчета вычислялись средний падающий лучистый поток (солнечный) на поверхность абсорбера и температуры воды на входе и выходе из коллектора.

Моделирование работы плоского солнечного коллектора проводилось под воздействием солнечного облучения в диапазоне от 148,86 до 1018,98 Вт/м², что соответствует минимальному и максимальному солнечному лучевому тепловому потоку в Москве. Рассматривалось воздействие ветра в диапазоне скоростей от 0 до 4 м/с, также наиболее характерных для Москвы. При увеличении скорости ветра до 4 м/с зафиксировано падение перепада температуры на 26,46 % относительно безветренной погоды.

На рис. 1 представлен перепад температур на входе и выходе из коллектора для разных скоростей ветра в зависимости от времени в период наибольшего нагрева — со второго по седьмой час работы, что соответствует 12:00 и 17:00.

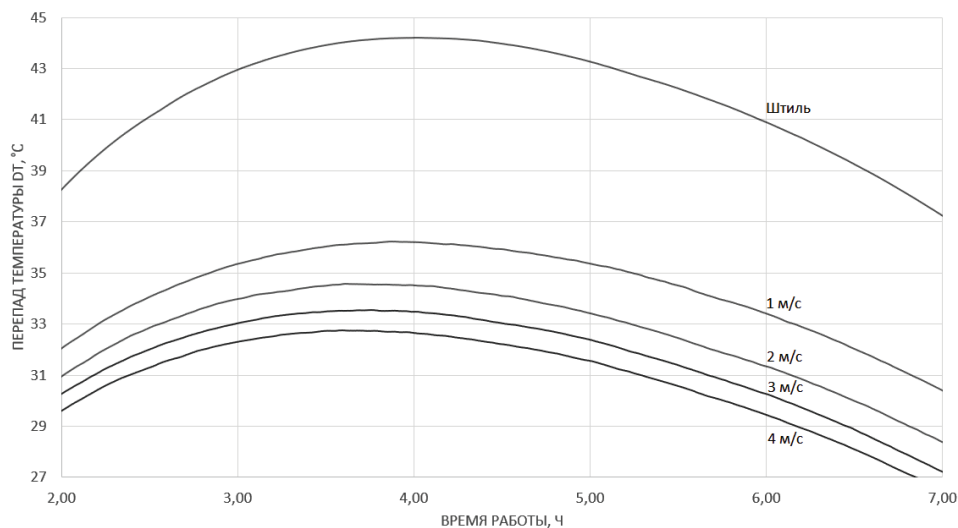


Рис. 1. График перепада температур теплоносителя между входом и выходом из коллектора по времени

Полученные результаты показывают, что наличие ветра существенно влияет на эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую, поэтому при выборе места установки солнечного коллектора нужно учитывать не только угол падения солнечного излучения, но и розу ветров.

Список источников

1. Renewables 2019 Global Status Report [Electronic resource]. URL: <https://www.ren21.net/gsr-2019/> (date of access: 04.12.2020).
2. Камотина Е. В., Швецов М. А., Велькин В. И. Повышение эффективности теплоснабжения объекта включением солнечных коллекторов в существующую схему // Труды третьей науч.-техн. конф. молодых ученых Урал. энергет. ин-та. Екатеринбург : УрФУ, 2018. С. 158–161.
3. Aqua-CSP: Concentrating Solar Power for Seawater Desalination — Final Report. German Aerospace Centre (DLR), 2007 [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/259894735_AQUA-CSP_Concentrating_Solar_Power_for_Seawater_Desalination_-_Final_Report (date of access: 04.12.2020).
4. Helind LLC — Your energy alternative [Electronic resource]. URL: <https://helind.com/> (date of access: 04.12.2020).

УДК 621.224

ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИЛИВНОЙ ГЭС

В. Е. Малыгин¹, А. И. Попов²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ vmalygin97@gmail.com

Аннотация. В работе описана установка приливной бесплотинной гидроэлектростанции (ГЭС) для выработки электрической энергии путем использования энергии морских течений.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, приливная бесплотинная ГЭС

ELECTRIC ENERGY GENERATION OF THE TIDAL HPP

V. E. Malygin¹, A. I. Popov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ vmalygin97@gmail.com

Abstract. The paper describes the installation of a tidal damless hydroelectric power station for generating electrical energy by using the energy of sea currents.

Keywords: renewable energy sources, tidal damless hydroelectric power station

Начало XXI в. обусловлено переходом к шестому технологическому укладу, который подразумевает широкое использование альтернативных и возобновляемых источников энергии.

Течение воды является одним из наиболее стабильных источников получения энергии. Для установки гидроэлектростанций необходим подходящий рельеф местности, который не всегда удастся найти на побережье океанов и морей. Однако использовать энергию приливов и отливов в этих местах вполне реально, что дает некоторые преимущества приливной энергетике.

Приливная бесплотинная гидроэлектростанция (ПЭС) — это инженерное сооружение, которое преобразовывает энергию приливов и отливов в электрическую энергию.

Еще в Римской империи были известны мельницы, которые работали на энергии приливов и отливов. Первая плотинная электростанция (мощностью 0,635 МВт) была построена в 1913 г., она располагалась в бухте реки Ди (Dee) неподалеку от Ливерпуля (Великобритания).

Всерьез воспринимать приливную электроэнергетику стали только в 1966 г., когда в Ля-Ранс (Франция) была запущена крупнейшая по тем временам ПЭС мощностью 240 МВт. На ней установлены 24 турбины. Функционирование такой электростанции оказалось выгодным делом. Если сравнивать, например, с атомными электростанциями, то стоимость выработки киловатт-часа на ПЭС Ля-Ранс оказывается в 1,5 раза дешевле [1].

Если обратиться к новейшей истории России, продолжение развития приливной энергетики приходится на 2004 г., когда Кислогубскую ПЭС расконсервировали и установили вместо импортного отечественный агрегат мощностью 0,2 МВт, а в 2007 г. запустили новый энергоблок мощностью 1,5 МВт. Собственником Кислогубской ПЭС в настоящее время является «РусГидро».

На основе результатов анализа недостатков известных приливных ГЭС, одним из которых является сооружение плотины (до 80 % от стоимости всего гидроузла) [2], на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета (АСиВИЭ УрФУ) была разработана конструкция приливной ГЭС, оформленная патентом на изобретение [3].

Основными конструктивными элементами приливной ГЭС, которые изображены на рис. 1, являются: 1 — цилиндрическая емкость; 2 — резервуар для накопления воды; 3 — нагнетающий трубопровод; 4 — трубопровод для стока воды; 5 — обратный заборный клапан; 6 — двуправленная гидротурбина Уэльса; 7 — электрический генератор; 8 — отверстие для входа воды; 9 — отверстие для выхода воздуха из верхней части гидротурбины [3].

Необходимо отметить несколько важных моментов, которые являются техническим результатом такой разработки:

1) использование цилиндрической емкости с расположенной у ее основания гидротурбиной; отверстие для входа в емкость воды находится ниже по уровню, чем гидротурбина;

2) увеличение количества вырабатываемой электроэнергии достигается применением дополнительного накопительного резервуара, который соединен сверху нагнетающим воду трубопроводом, а внизу оснащается трубопроводом для стока воды с обратным запорным клапаном, при этом трубопровод находится выше гидротурбины;

3) двунаправленная гидротурбина Уэльса, которая соединена с электрическим генератором, служит в качестве гидротурбины и работает на входящем в цилиндрическую емкость и выходящем из нее потоке воды.

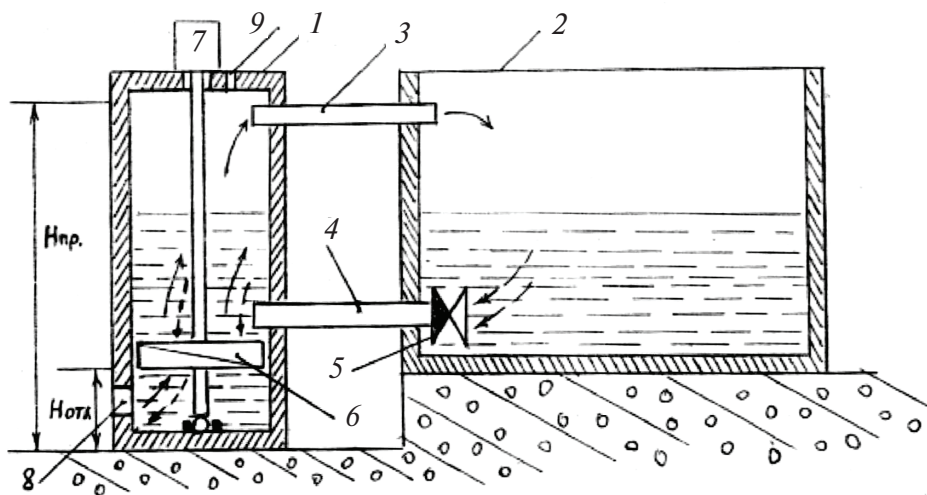


Рис. 1. Основные элементы приливной ГЭС

Принцип работы приливной ГЭС заключается в следующем. При приливе вода идет в цилиндрическую емкость через отверстие, далее проходит гидротурбину, которая находится во вращении, и, поднявшись до верхнего уровня емкости, через нагнетающий трубопровод переливается в накопительный резервуар большой емкости, за счет этого достигается увеличение время работы гидротурбины и количество вырабатываемой электрической энергии. При отливе выходит из цилиндрической емкости снова через гидротурбину и отверстие из установки. Когда уровень воды в цилиндрической емкости понижается до уровня трубопровода стока воды, происходит открытие обратного запорного клапана и уже в цилиндрическую емкость начнет поступать вода на гидротурбину. Исключительное свойство двунаправленной ги-

дротурбины заключено в том, что нет зависимости от направления водного потока в цилиндрической емкости, гидротурбина будет иметь вращение в одном направлении.

Емкость резервуара для накопления воды получена с учетом максимального времени работы гидротурбины и связанного с ним генератора в период пауз между приливами и отливами.

Похожая конструкция приливной ГЭС представлена в работе под названием «Волновая электростанция», в которой конструктив упрощен путем отказа от резервуара для накопления воды [4].

Рассматриваемое сооружение может широко использоваться не только удаленными от магистральных сетей индивидуальными потребителями, но и маленькими поселениями. Приливная ГЭС работает в автоматическом режиме и не требует обслуживающего персонала на постоянной основе. Кроме того, за счет сборки из серийных узлов и конструкции достигается минимальная стоимость сооружения, что делает установку конкурентноспособной на рынке оборудования на основе возобновляемых источников энергии.

Список источников

1. От приливных электростанций к гидроэнергетике будущего [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/articles/ot-prilivnyh-elektrostantsij-k-gidroenergetike-budu/> (дата обращения: 08.12.2020).

2. Соломатин А. С., Мирзоян А. Г., Суруджан А. С. Использование приливных электростанций в системе энергоснабжения // Технические науки: теория и практика : материалы III Междунар. науч. конф. (Чита, апр. 2016 г.). Чита : Молодой ученый, 2016. С. 85–88.

3. Приливная ГЭС : пат. 2732359 Рос. Федерация : МПК F 03 В 13/26, E 02 В 9/08 / А. И. Попов ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». № 2019131021 ; заявл. 02.10.2019 ; опубл. 15.09.2020, Бюл. № 26.

4. Волновая электростанция : пат. 2459974 Рос. Федерация : МПК F03В 13/24 / Ю. Б. Шполянский [и др.]. № 2011107449/06 ; заявл. 28.02.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.

УДК 546.22

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СЛОИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. В. Поздин¹, Л. Н. Маскаева², В. Ф. Марков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ andrej.pozdin@yandex.ru

Аннотация. Химическим осаждением получены тонкие пленки твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ *n*- и *p*-типа проводимости, исследованы их морфология и элементный состав. Сделан вывод о возможности применения твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ для создания гетероперехода в производстве солнечных элементов.

Ключевые слова: гидрохимическое осаждение, тонкие пленки, твердые растворы $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, солнечные элементы

THIN-FILM LAYERS OF SOLID SOLUTIONS $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ — PROSPECTIVE COMPOUNDS FOR THE CREATION OF SOLAR ELEMENTS

A. V. Pozdin¹, L. N. Maskaeva², V. F. Markov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ andrej.pozdin@yandex.ru

Abstract. Thin films of the *n*- and *p*-type $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ solid solution were obtained by chemical deposition, and their morphology and elemental composition were studied. It is concluded that it is possible to use $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ solid solutions to create a heterojunction in the production of a solar cells.

Keywords: hydrochemical deposition, thin films, solid solutions $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, solar cells

Длительное время не ослабевает интерес к трехкомпонентным пленкам на основе полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{II}}-\text{B}^{\text{VI}}$

и $A^{IV}-B^{VI}$, расширяющих возможность модификации структурных, полупроводниковых и функциональных свойств бинарных халькогенидов металлов. К одним из наиболее востребованных тонкопленочных соединений можно отнести твердые растворы замещения в системе $PbS-CdS$, поскольку, варьируя содержание кадмия в структуре сульфида свинца, возникает возможность влиять на ширину запрещенной зоны материала в пределах 0,41–2,42 эВ, а также на его основные электрофизические свойства. Это позволяет значительно расширить области практического использования твердых растворов $Cd_xPb_{1-x}S$. Одной из перспективных областей применения этих соединений является фотовольтаика, т. е. создание фотоэлементов с p - n -переходом [1].

Тонкопленочные твердые растворы $Cd_xPb_{1-x}S$ получали химическим осаждением из реакционной смеси, содержащей фиксированные концентрации ацетата свинца $Pb(CH_3COO)_2$, цитрата натрия $Na_3C_6H_5O_7$, водного раствора аммиака NH_4OH и тиомочевины N_2H_4CS . Для получения тонкопленочных покрытий с различным типом проводимости использовали 0,06 и 0,08 М водные растворы хлорида кадмия $CdCl_2$. В качестве подложек при осаждении обсуждаемых пленок использовали стекло с проводящим слоем ИТО состава $(In_2O_3)_{0,9}(SnO_2)_{0,1}$. Предварительно обезжиренные подложки, закрепленные во фторопластовые держатели, помещали в герметичные реакторы из молибденового стекла, которые погружали в термостат марки ТС-ТБ-10. Синтез пленок осуществляли при температуре 353 К в течение 30 минут.

Толщину полученных пленок определяли с использованием интерференционного микроскопа Линника МИИ-4 М. Погрешность измерения составляла 20 %.

Исследование морфологии поверхности и элементного состава пленок проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с применением сканирующего растрового микроскопа JEOL JSM-5900LV с приставкой для энергодисперсионного анализа — рентгеновского спектрометра EDS Inca Energy 250.

Тип проводимости пленок определяли по знаку термоэдс при создании градиента температуры в области зондовых контактов.

Электронно-микроскопические изображения пленок твердых растворов $Cd_xPb_{1-x}S$ толщиной 180–190 нм, полученных химическим осаждением из реакционной ванны, содержащей 0,06 и 0,08 М соли кадмия, демонстрирует рис. 1.

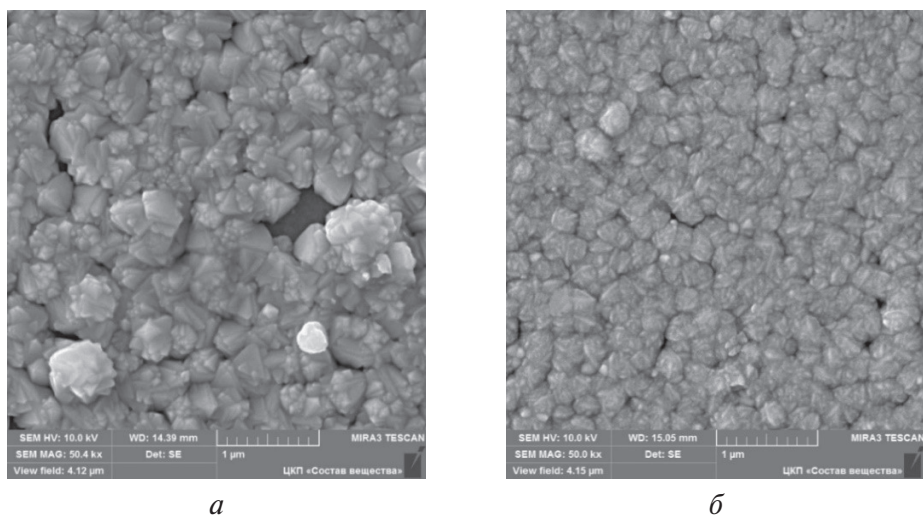


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения пленок $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, синтезированных в течение 30 мин при 353 К на подложках из стекла + ИТО при концентрации соли CdCl_2 0,06 (а) и 0,08 М (б)

Анализ электронно-микроскопических изображений пленок показывает, что концентрация соли кадмия влияет на архитектуру и размеры кристаллитов, из которых образована пленка $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ (рис. 1). При концентрации CdCl_2 0,06 М в реакционной ванне получена пленка, представляющая собой неоднородную микроструктуру со степенью сплошности $\sim 80\text{--}85\%$. Слой состоит из небольшого количества отдельных кристаллитов, между которыми располагаются сплюснутые пирамидки со сглаженными гранями и друзы в форме цветкообразных агрегатов (рис. 1, а). Весьма однородной, состоящей из глобул примерно одинакового размера (~ 220 нм), в состав которых входят более мелкие сферические частицы преимущественно размером 45–70 нм, выглядит пленка $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, синтезированная из реактора при 0,08 М CdCl_2 (рис. 1, б).

Для установления элементного состава синтезированных пленок проведен энергодисперсионный микроанализ, согласно которому содержание серы в обсуждаемых образцах составило 48,54 и 50,55 ат. %, свинца — 46,04 и 2,67 ат. %, а количество кадмия — 5,42 и 46,78 ат. % при концентрациях соли кадмия 0,06 и 0,08 М соответственно.

Измерение типа проводимости исследуемых пленок, осуществляемое по знаку термоэдс при создании градиента температур в области

зондовых контактов, показало, что слои $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, полученные из реакционной смеси, содержащей 0,06 М CdCl_2 , обладают n -типом проводимости, а при 0,08 М CdCl_2 имеют p -тип проводимости.

Таким образом, синтезированные в настоящей работе тонкопленочные слои $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ с n - и p -типом проводимости можно рекомендовать для создания на их основе гетероструктур (рис. 2), востребованных солнечной энергетикой.

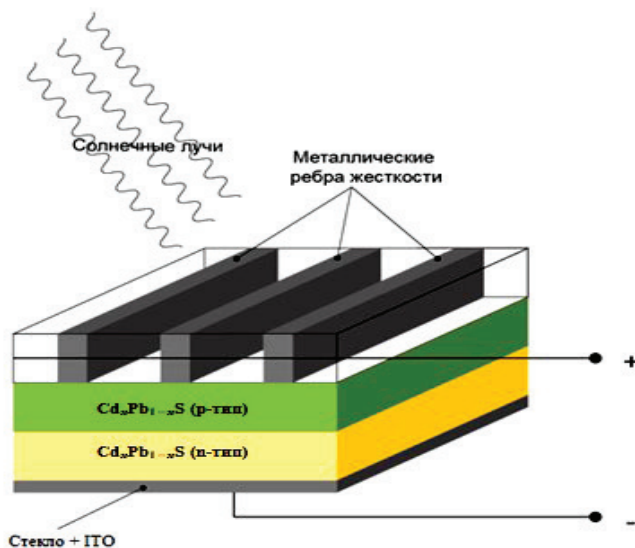


Рис. 2. Структура солнечного элемента

Формирование гетероструктур на базе относительно простых соединений ($\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$), полученных по технологии, исключающей необходимость в сложном дорогостоящем оборудовании, использовании высоких температур и давлений, является несомненным преимуществом по сравнению с физическими методами синтеза.

Список источников

1. Growth mechanism and transport properties of chemically deposited $\text{Pb}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ thin film's photoelectrochemical (PEC) solar cell [Electronic resource] / K. E. Suryavanshi [et al.] // Optik. 2020. Vol. 218. P. 165008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165008> (date of access: 14.11.2020).

УДК 621.311

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОММУНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ВИЭ

Р. Н. Рахматулин¹, Е. А. Скороплетов²

^{1,2} Южно-Уральский государственный аграрный университет,
Челябинск, Россия

¹ ibrogim548@gmail.com

Аннотация. Предложено повысить энергоэффективность систем водоснабжения и водоотведения посредством использования гидросилового оборудования, установки теплового насоса и утилизации избыточного ила в биореакторе для выработки биогаза.

Ключевые слова: энергоэффективность, система водоснабжения, система водоотведения, очистные сооружения, теплонасосная установка, гидро-энергия, утилизация ила

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF MUNICIPAL SYSTEMS BY INTRODUCING INSTALLATIONS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

R. N. Rahmatylin¹, E. A. Skoropletov²

^{1,2} South-Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

¹ ibrogim548@gmail.com

Abstract. It is possible to increase the energy efficiency of water supply and sanitation systems by using hydro-power equipment, installing a heat pump, and utilizing excess sludge in a bioreactor to generate biogas.

Keywords: energy efficiency, water supply system, water disposal system, sewage treatment plants, heat pump installation, hydroelectric power, sludge disposal

Повышение энергетической эффективности, рациональное природопользование и внедрение технологий на базе возобновляе-

мых источников энергии (ВИЭ) входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в России [1].

Себестоимость коммунальных услуг по водоснабжению и водоотведению для населения и предприятий состоит в значительной мере из затрат на электроэнергию, что остро ставит проблему повышения энергоэффективности в коммунальных системах, в частности, в системах водоснабжения и водоотведения [2].

Система водоснабжения включает в себя станцию водоподготовки, насосное оборудование и разветвленную сеть трубопроводов. Часто в качестве источника водоснабжения используется поверхностный водоем. Получать гидроэнергию в таком случае можно при установке гидросилового оборудования за счет санитарных попусков в нижний бьеф. Мощность установки будет зависеть от расхода воды и разностей уровней верхнего и нижнего бьефов [3; 4].

Разветвленная трубопроводная сеть обладает запасами кинетической энергии, которые особенно значительны в городах с изменяющимся рельефом, например в горной местности. Для случаев накопления излишней кинетической энергии в системах водоснабжения устанавливаются клапаны сброса давления. Использовать эту энергию позволяет установка микротурбин в трубопровод. Такие системы пока не получили распространения на территории России, но испытываются и внедряются за рубежом. Наиболее перспективными для установки в трубопровод считаются ортогональные турбины [5; 6].

Рассчитать напор, создаваемый в трубопроводной сети, можно используя уравнение Бернулли для определения удельной энергии потока e

$$e = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha w^2}{2g};$$

где z — удельная энергия положения (м); ρ — плотность жидкости (кг/м³); g — ускорение свободного падения (м/с²); $\frac{P}{\rho g}$ — удельная потенциальная энергия давления (м); $\alpha = 1,03...1,1$ — коэффициент Кориолиса; w — средняя скорость (м/с).

Очистные станции — комплекс сооружений, обеспечивающих обеззараживание сточных вод, которые впоследствии сбрасываются в есте-

ственный водоем, имеют потенциальные ресурсы как для выработки электрической энергии, так и тепловой.

Использовать гидроэнергетические ресурсы очистных сооружений возможно путем установки гидросилового оборудования на прудах отстойниках, сооружаемых каскадом [7; 8].

Проблемой очистных сооружений является избыточный ил, использование которого в биореакторе позволит вырабатывать биогаз с его использованием в качестве топлива собственной котельной, необходимой для технологических нужд станции [8; 9].

В технологических целях для поддержания жизнеспособности бактерий, а также для ускорения химических реакций при обеззараживании, поддерживают температуру сточной воды 22 °С, которая после прохождения биофильтров остывает в отстойниках [10]. Использовать сбросную тепловую энергию прудов-отстойников возможно путем укладки контура испарителя теплового насоса, конденсатор при этом рационально установить в биофильтры, что позволит снизить затраты на тепловую энергию [11; 12].

При рассмотрении внедрения установок на базе ВИЭ, необходимо учитывать жизненный цикл внедряемых объектов. Для этой цели можно использовать применяемый за рубежом показатель LCoE, который позволяет определять себестоимость вырабатываемой энергии (тепловой или электрической), сравнение которой с величиной тарифа позволит определить перспективность проекта [13].

Список источников

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации [Электронный ресурс] : указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 (в ред. Указа Президента РФ от 16.12.2015 № 623). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514> (дата обращения: 25.11.2020).

2. Феофанов Ю. А., Адельшин А. Б., Нуруллин Ж. С. Пути экономии энергоресурсов в системах водоснабжения // Изв. КГАСУ. 2012. № 2 (20). С. 153–159.

3. Пташкина-Гирина О. С., Гусева О. А. Использование гидроэнергетического потенциала готовых напорных гидроузлов в энергетических целях. Челябинск : ЮУрГАУ, 2020. 178 с.

4. Гидроэлектростанция : пат. на полезн. модель 100775 Рос. Федерация, МПК Е 02 В 9/00 / О. С. Пташкина-Гирина [и др.]. № 2010128195/21 ; завл. 07.07.2010 ; опубл. 27.12.2010.

5. Гусева О. А., Ендальцев К. О. Использование гидравлической энергии водопроводных систем // Приоритетные направления развития энергетики в АПК : материалы I Всерос. науч.-практ. конф. (28 сент. 2017 г.). Курган: Изд-во Курган. ГСХА, 2017. С. 114–117.

6. Ендальцев К. О., Гусева О. А. Использование гидравлической энергии в системе водоснабжения и водоотведения // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений. Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 728–732.

7. Курильчик С. Ю., Шаталов Н. С., Гусева О. А. Возможность применения малых ГЭС на очистных сооружениях // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений. Екатеринбург : УрФУ, 2018. С. 683–686.

8. Гусева О. А., Пташкина-Гирина О. С. Повышение энергоэффективности очистных сооружений путем внедрения установок на базе возобновляемых источников энергии // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. (Казань, 18–19 марта 2020 г.) : в 2 т. Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2020. Т. 2. С. 321–327.

9. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / под ред. П. П. Безруких. М. : Энергия, 2007. 272 с.

10. Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. М. : АСВ, 2006. 702 с.

11. Пташкина-Гирина О. С., Гусева О. А., Жарков Е. В. Возможность применения теплонасосных установок для энергообеспечения автономных потребителей Челябинской области // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. (Кемерово, 19–21 дек. 2018 г.). Кемерово : КузГТУ, 2018. С. 161.1–161.4.

12. Гусева О. А., Пташкина-Гирина О. С. Утилизация гидравлической и тепловой энергии искусственных водосбросных сооружений // Наука ЮУрГУ : материалы 70-й науч. конф. Челябинск : Юж.-Урал. гос. ун-т, 2018. С. 432–435.

13. Ptashkina-Girina O. S., Nizamutdinova N. S., Guseva O. A. Technical-economic assessment of small hydro-power units [Electronic resource] // Proceedings 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 4–6 Oct. 2018. Chelyabinsk: IEEE Xplore, 2018. P. 101–106. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544277 (date of access: 12.11.2020).

УДК 620.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ (СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ) ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

А. А. Резиньков¹, С. Е. Щеклеин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ aleksei_rezinkov@outlook.com

Аннотация. В работе представлено технико-экономическое сравнение гибридных (солнечно-дизельных) электростанций в зависимости от их местоположения на территории РФ. Рассчитаны затраты на приобретение дизельного топлива и себестоимость производимой электроэнергии для дизельной и гибридной электростанций в выбранном регионе. Сравнительный анализ количественных показателей гибридных электростанций выполнен на основе результатов, представленных в таблице.

Ключевые слова: гибридная электростанция, дизельное топливо, себестоимость электроэнергии

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF HYBRID (SOLAR-DIESEL) POWER PLANTS FOR REGIONS OF RUSSIA

A. A. Rezinkov¹, S. E. Shcheklein²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ aleksei_rezinkov@outlook.com

Abstract. The paper presents a technical and economic comparison of hybrid (solar-diesel) power plants depending on location on the territory of the Russian Federation. The cost of purchasing diesel fuel and the cost price of electricity generated by diesel and hybrid power plants in the selected region have been calculated. A comparative analysis of the quantitative indicators of hybrid power plants was carried out on the basis of the results presented in the table.

Keywords: hybrid power plant, diesel fuel, cost price of electricity

Основными достоинствами эксплуатации гибридной (солнечно-дизельной) электростанции являются существенная экономия дизельного топлива и увеличение ресурса электрогенератора [1]. В статье рассмотрена экономическая эффективность использования такого типа станции для частного дома в различных городах России, приведенных на рис. 1.



Рис. 1. Карта инсоляции территории РФ [2]

Для анализа был выбран вариант создания гибридной станции, предусматривающий параллельную работу солнечных модулей и дизельного генератора [3]. Принципиальная схема изображена на рис. 2. Особенностью такой схемы является возможность максимального использования установленной мощности солнечной фотоэлектрической станции без использования накопителей, что приводит к существенному снижению затрат.



Рис. 2. Принципиальная схема гибридной электростанции

Критерием экономической эффективности выступает себестоимость электрической энергии гибридной станции относительно дизельной.

Приведенные затраты гибридной электростанции, р./г.:

$$З_{\text{гиб}} = (E_{\text{н}} K_{\text{сфэс}} + I_{\text{сфэс}}) + (E_{\text{н}} K_{\text{дг}} + I_{\text{дг}} + \Pi_{\text{диз}} [G_{\text{диз}} W_{\text{диз}}]),$$

где $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, 1/г.; $K_{\text{сфэс}}$, $K_{\text{дг}}$ — единовременные капитальные вложения в солнечную фотоэлектрическую станцию и в дизель-генераторную станцию соответственно, р./г.; $I_{\text{сфэс}}$, $I_{\text{дг}}$ — годовые эксплуатационные издержки, р./г.; $\Pi_{\text{диз}}$ — стоимость дизельного топлива, р./л [4]; $G_{\text{диз}}$ — удельный расход дизельного топлива, л/(кВт · ч); $W_{\text{диз}}$ — количество электроэнергии, вырабатываемой дизельной станцией для покрытия дефицита, (кВт · ч)/г.

Себестоимость электроэнергии гибридной электростанции, р./(кВт · ч):

$$C_{\text{гиб}} = \frac{З_{\text{гиб}}}{W_{\text{гиб}}},$$

где $W_{\text{гиб}}$ — количество электроэнергии, выработанной гибридной (солнечной фотоэлектрической и дизельной) станцией, (кВт · ч)/г.

Результаты расчетов и анализа сведены в таблицу.

Таблица

Экономические показатели в зависимости от размещения станции

Показатель	Город						
	Владивосток	Москва	Новосибирск	Сочи	Томск	Челябинск	Якутск
Стоимость дизельного топлива, р./л	50,39	47,65	49,83	45,81	49,90	46,89	59,69
Затраты на дизельное топливо дизельной станции, р./г.	145667,41	137746,62	144048,56	132427,55	144250,92	135549,61	172551,85
Затраты на дизельное топливо гибридной станции, р./г.	10474,08	51261,87	42967,91	39395,68	42731,87	39829,30	57676,87
Изменение	−92 %	−63 %	−70 %	−70 %	−70 %	−71 %	−67 %

Окончание табл.

Показатель	Город						
	Владивосток	Москва	Новосибирск	Сочи	Томск	Челябинск	Якутск
Себестоимость энергии дизельной станции, р./($\text{кВт} \cdot \text{ч}$)	18,89	17,99	18,70	17,38	18,73	17,73	21,96
Себестоимость энергии гибридной станции, р./($\text{кВт} \cdot \text{ч}$)	15,26	18,92	17,53	15,61	17,73	17,17	19,54
Изменение	–19 %	+5 %	–6 %	–10 %	–5 %	–3 %	–11 %

На основе анализа полученных данных можно сделать вывод, что применение гибридных (солнечно-дизельных) электростанций оказывается выгоднее (дешевле) дизельных установок. Их расположение целесообразно в регионах с высоким приходом солнечной радиации (Владивосток, Сочи) или в регионах с высокой стоимостью топлива (Якутск).

Список источников

1. Велькин В. И., Щелоков Я. М., Щеклеин С. Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение / под ред. В. И. Велькина. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 312 с.
2. О солнечной энергетике [Электронный ресурс] // Хевел. URL: <https://ekb.hevelsolar.com/o-solnechnoi-energetike/> (дата обращения: 06.12.2020).
3. Лукутин Б. В., Муравлёв И. О., Плотников И. А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. 128 с.
4. Средние потребительские цены на бензин автомобильный и дизельное топливо в субъектах Российской Федерации в сентябре 2020 года [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/bgd/free/B04_03/IssWWW.exe/Stg/d05/198.htm (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 621.311.24

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ПУСК МНОГОЛОПАСТНОЙ ВЭУ ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ ШТОРМОВЫМ ВЕТРОМ

В. В. Свистунов¹, И. Р. Хайретдинов², Н. М. Хомитов³, В. И. Велькин⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ svistunov.seva@yandex.ru

Аннотация. В работе описано восстановление и наладка многолопастной ветроэлектроустановки ВЭУ-4–5-18 мощностью 4 кВт, установленной в энергоэффективном доме в поселке Растущий Белоярского района Свердловской области. ВЭУ была повалена по причине неподготовленности к сильному штормовому ветру из-за несрабатывания механизма флюгерения и ненадежного закрепления стоек в фундаментных плитах на кронштейнах.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, монтаж многолопастной ВЭУ

RECONSTRUCTION AND START-UP OF MULTI-VANE WIND POWER AFTER DESTRUCTION BY STORM WIND

V. V. Svistunov¹, I. R. Khairatdinov², N. M. Khomitov³, V. I. Velkin⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ svistunov.seva@yandex.ru

Abstract. The paper describes the restoration and adjustment of a multi-blade wind turbine VEU-4–5-18 with a capacity of 4 kW, installed in an energy-efficient house in the village of Rastushiy, Beloyarsk District, Sverdlovsk Region. The wind turbine was knocked down due to unpreparedness for a strong gale wind due to failure of the weather vane mechanism and unreliable fastening of the racks in the foundation slabs on the brackets.

Keywords: renewable energy sources, wind power plant, installation of multi-blade wind turbines

В статье рассматривается практическая задача по восстановлению и наладке многолопастной ветроэлектростанции ВЭУ-4–5-18 мощностью 4 кВт [1] после сильного штормового ветра (28–30 м/с, 10 баллов по Бофорта [2]) в июне 2018 г. Штормовой ветер продолжался всего 1–2 минуты, и собственник не успел зафлюгерить многолопастную ВЭУ, которая ввиду значительной парусности была повалена на землю. В результате были разрушены 6 лопастей из 18-ти и четверть конструкции каркаса ветроколеса. Деформированное ветроколесо представлено на рис. 1.



Рис. 1. Деформированное ветроколесо

Сложность ремонта и восстановления ВЭУ заключалась в том, что новые лопасти, изготовленные из алюминия, были гораздо легче по весу, чем оригинальные из листового железа. Их установка в один сектор подряд оказалась невозможной, т. к. способствовала бы дисбалансу, что существенно повлияло бы на крутящий момент ветроколеса в целом. Было принято решение устанавливать новые лопасти через одну с оригинальными по всему диаметру ветроколеса для равномерного распределения масс.

Из-за деформации каркаса жесткости ветроколеса некоторые элементы пришлось переделывать и подстраивать под нужные размеры. Полностью восстановленное ветроколесо представлено на рис. 2.

После поднятия конструкции генератора ВЭУ на установочный стол начался процесс стыковки и крепления головки ВЭУ к мачте. Далее с конструкцией головки ВЭУ были сочленены покрашенные киль и лопасть (для поворота ВЭУ при ветре, превышающем допустимую скорость 25 м/с).



Рис. 2. Восстановленное ветроколесо

Результат проделанной работы по установке ветроколеса и присоединения киль и лопасти ВЭУ приведен на рис. 3.



Рис. 3. Установленное ветроколесо, киль и лопасть ВЭУ

Заключительный этап начался с подключения замененного электрического кабеля к генератору. Перед подъемом ветроустановки дополнительно проверялись и протягивались все соединительные элементы. После подъема ВЭУ закрепление конструкции было выполнено с помощью четырех тальрепов к площадке из трех аэродромных плит, на которые установлена ветроустановка [3]. Для полного восстановления ВЭУ после последствий урагана было затрачено 10 дней. Полностью восстановленная ветроустановка (ВЭУ-4-5-18) представлена на рис. 4.



Рис. 4. Восстановленная ветроустановка

Причиной падения многолопастной ВЭУ в июне 2018 г. явились неподготовленность к ветру более 25 м/с (несрабатывание механизма флюгерения) и ненадежное закрепление стоек в фундаментных плитах на кронштейнах [4].

В ходе производственной практики студентов кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета (АСиВИЭ УрФУ) была полностью восстановлена, отревизирована и поднята ветроэнергетическая установка марки ВЭУ-4-5-18.

Восстановленная ВЭУ успешно выдержала 8 сентября 2020 г. штормовой ветер 28–30 м/с (10 баллов по шкале Бофорта) без флюгерения. Это позволяет говорить о том, что с флюгерением ВЭУ в состоянии будет выдержать ветра со скоростью 30–35 м/с.

Список источников

1. Безруких П. П. Ветроэнергетика. М. : Энергия, 2010. 320 с.
2. Huler S. Defining the Wind: the Beaufort Scale, and How a 19th-Century Admiral Turned Science into Poetry. N. Y. : Crown Publishers, 2004. 304 p.
3. ГОСТ Р 54418.1–2012 (МЭК 61400–1:2005). Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования. М. : Стандартинформ, 2016. 83 с.
4. Елистратов В. В. Использование возобновляемой энергии. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 224 с.

УДК 697.329

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА И ЗЕМЛИ

Е. М. Старовойтова¹, А. С. Колпаков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Katya.03.es@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена энергоэффективная гибридная система тепло-снабжения зданий с солнечной водонагревательной установкой и геотермальным тепловым насосом.

Ключевые слова: солнечная энергия, геотермальный тепловой насос, система теплоснабжения, коллектор, энергоэффективность

COMBINED HEAT SUPPLY SYSTEM USING THE ENERGY OF THE SUN AND EARTH

E. M. Starovoitova¹, A. S. Kolpakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Katya.03.es@gmail.com

Abstract. An energy-efficient hybrid heat supply system for buildings with a solar water heating system and a geothermal heat pump is considered.

Keywords: solar energy, geothermal heat pump, heat supply system, collector, energy efficiency

Одной из главных задач энергетики является удовлетворение потребностей промышленности и жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) в тепловой энергии. Особо остро этот вопрос стоит в районах, удаленных от централизованных систем теплоснабжения. Запасы традиционных углеводородных ресурсов, используемых в этих целях, ограничены. Помимо этого обстоятельства, рост энер-

гопотребления и экологическая безопасность требуют увеличения энергоэффективности зданий. Решению названных проблем может способствовать применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

Системы теплоснабжения с солнечными водонагревательными установками (СВНУ), использующие в своей основе солнечные коллекторы, могут быть применены как для отопления, так и для горячего водоснабжения, особенно на объектах индивидуального строительства. Однако широкое их применение осложнено климатическими факторами.

В силу объективных географических и экономических причин, а также требований энергоэффективности большая часть гелиоустановок используется в низких широтах, там, где много солнца, большинство дней в году безоблачные и теплые, а умеренное потребление тепловой энергии определяется достаточно высокой температурой окружающей среды. Однако на значительной территории России среднегодовой уровень инсоляции ограничен при стоянии низких среднегодовых температур. В среднем эксплуатационный период гелиоустановок не более 1530 ч в год. Потенциал энергии, передаваемой солнцем, наиболее велик на юго-западе страны, на Дальнем Востоке и в Южной Сибири, и именно в этих регионах рекомендуется использование солнечных коллекторов.

Помимо вышеперечисленных факторов на эффективность использования солнечной энергии в системах теплоснабжения влияют также схемы и конструктивные особенности самих СВНУ.

Поглощение солнечной радиации происходит в коллекторе. Для поддержания эффективности установок коллекторы должны обладать способностью поглощать как можно больше попадающей на них солнечной энергии, эффективно передавать полученное тепло теплоносителю и, самое главное, иметь низкие собственные теплопотери. По этой причине существенную роль играют их тип, параметры составляющих их компонентов, наклон и ориентация относительно направления лучей Солнца.

При проектировании энергоэффективных зданий, в основе систем теплоснабжения которых закладывается СВНУ, главной задачей является достижение равномерной генерации тепловой энергии необходимого потенциала для покрытия нагрузок. Учитывая нестабильный уровень самой генерации солнечной энергии, положительного

результата можно достичь путем использования систем комбинированного геотеплоснабжения.

Грунт — один из самых стабильных источников тепла, которое накапливается за летний сезон. Для получения тепла геотермальные тепловые насосы используют низкопотенциальную тепловую энергию земли: ее температура на глубине ниже 6 м примерно равна среднегодовой температуре воздуха в этой местности и слабо изменяется в течение года. Благодаря многочисленным разработкам и усовершенствованиям такие тепловые насосы способны поддерживать работоспособность системы теплоснабжения даже при значительных отрицательных температурах окружающей среды.

Полностью бестопливной и экологически чистой является гибридная установка солнечной и геотермальной отопительных систем. Комплексный подход создания солнечных установок в сочетании с геотермальными тепловыми насосами (ТН) позволяет использовать солнечный энергетический потенциал на достаточно высоком уровне и круглогодично эксплуатировать СВНУ в системах теплоснабжения. Такая комплексная система СВНУ и ТН практически без потерь использует потенциал солнечной энергии, преобразуя его в тепло. Система имеет два эксплуатационных режима. Энергия с коллекторов поступает в систему отопления и горячего водоснабжения (ГВС) дома и по возможности работает без помощи теплогенератора. При недостатке теплоты солнечной радиации в работу автоматически включается тепловой насос. Избыток тепла от коллекторов, выработанный за день, сохраняется в тепловом аккумуляторе для использования в ночное время и в последующие дни.

В теплое время года нагрузка на ГВС полностью ложится на солнечные коллекторы. Высокую энергоэффективность обеспечивают трубчатые коллекторы, которые по сравнению с плоскими имеют более высокое энергетическое извлечение. Тепловой насос же может быть использован в целях охлаждения или кондиционирования здания за счет подземного холода в режиме реверсивной работы. За счет оснащения здания гелиосистемами и тепловыми насосами появляется возможность производить в летний период энергии больше, чем потреблять. Избыток солнечной радиации летом поступает в геотермальный контур теплового насоса, отдавая тепло охлажденному грунту, тепловой потенциал которого восстанавливается. Поступающее тепло повышает температуру грунта до $+12...+18\text{ }^{\circ}\text{C}$, подготавливая систе-

му к началу следующего отопительного сезона и повышая эффективность работы ТН на 30...50 % в сам отопительный сезон.

Достоинством комплексной системы теплоснабжения является независимость от внешних факторов и полная автоматизация регулирования протекающих процессов, обеспечивающая высокий уровень надежности и бесперебойности работы СНВУ.

Ощутимым недостатком гибридной системы являются требуемые капитальные вложения, превышающие таковые для традиционных систем теплоснабжения, поскольку тепловые насосы и солнечные коллекторы изготавливаются из дорогостоящих материалов. Однако благодаря комплексу характеристик — полной автономности, бестопливности, экологичности и приемлемому сроку окупаемости (до 7 лет) — такая схема теплоснабжения представляет безусловный интерес не только для потребителей, но и для инвесторов ввиду возможности получения прибыли при гарантированном высоком ресурсом СНВУ и ТН сроке эксплуатации не менее 20 лет.

Выполненные инженерные и технико-экономические расчеты по параметрам технического задания [2] (90-квартирный дом с числом жильцов 360 чел.) обнаруживают высокую конкурентную способность СНВУ с ТН в системе ГВС здания по сравнению другими дополнительными источниками теплоснабжения (электродкотлы, котлы на твердом и жидком топливе), обеспечивая уровень стоимостных показателей 1 м³ горячей воды, соответствующий газовым котлам.

Список источников

1. Велькин В. И., Щелоков Я. М., Щеклеин С. Е. Возобновляемая энергетика и энергосбережение / под общ. ред. В. И. Велькина. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 312 с.

2. Слесаренко И. В. Совершенствование систем теплоснабжения с солнечными водонагревательными установками (на примере Дальневосточного региона) : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Илья Вячеславович Слесаренко. СПб., 2016. 201 с.

УДК 621.5

РАЗРАБОТКА ОПЫТНОЙ МОДЕЛИ ТУРБИНЫ ФРЕНСИСА ДЛЯ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

А. А. Степаненко¹, Ю. А. Дерябина², А. И. Вальцева³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ 9stna9@bk.ru

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы использования альтернативных источников энергии, гидравлической энергии и самая распространенная турбина — радиально-осевая турбина Френсиса, спроектированная для нужд малой гидроэнергетики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика, турбина Френсиса

DEVELOPMENT OF A PILOT MODEL OF THE FRANCIS TURBINE FOR SMALL HYDROPOWER

A. A. Stepanenko¹, Yu. A. Deryabina², A. I. Valtseva³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ 9stna9@bk.ru

Abstract. This article discusses the problems of using alternative energy sources, hydraulic energy and the most common turbine — the Francis radial-axial turbine, designed for the needs of small hydropower.

Keywords: renewable energy, hydropower, the Francis turbine

В современном мире люди все больше задумываются над глобальными проблемами: разрушение озонового слоя, загрязнение воздуха и мирового океана, изменение климата. Эти проблемы отчасти могут решиться с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Необходимо отметить, что запасы традиционных источников энергии (угля, нефти и природного газа) не являются бесконечными. По этой

причине вопрос об использовании альтернативных источников энергии становится все более и более актуальным [1].

Гидроэлектростанции (ГЭС) обычно строят на реках, сооружая плотины и водохранилища. Ресурсы гидроэнергетики возобновляемы и являются экологически чистыми источниками энергии, благодаря им понижается уровень загрязняющих веществ в атмосфере [1].

Согласно Киотскому протоколу выработка электроэнергии ГЭС соответствует экологическим требованиям, т. к. не загрязняет окружающую среду токсичными отходами, не сопровождается выбросом в атмосферу парниковых газов. Такие объекты практически безопасны при возникновении естественных землетрясений и не являются причиной сейсмичности. ГЭС не оказывают отрицательного влияния на жизнь людей и животных. Все гидростанции можно разделить на три группы: мощные — от 25 МВт и выше; средние — до 25 МВт; малые — до 5 МВт [2].

На 2020 г. более миллиарда людей не имеет доступа к электричеству. В удаленной сельской местности сооружение государственных сетей часто технически не осуществимо. Малые гидростанции являются дешевыми и экологически чистыми и надежными источниками энергии.

Рост тарифов на электроэнергию и отсутствие достаточных мощностей делают актуальными вопросы о применении бесплатной энергии возобновляемых источников в домашних хозяйствах. По сравнению с другими источниками ВИЭ мини-ГЭС представляют интерес, т. к. при равной мощности с ветроэлектростанцией и солнечной батареей они способны выдать за равный промежуток времени гораздо больше энергии. Естественным ограничением на их применение является отсутствие реки.

Малые ГЭС могут разрабатываться на основе строительства новых объектов или реконструкции существующих плотин, основное предназначение которых — управление паводками или ирригация [3]. Старые объекты производства гидроэлектроэнергии в городской черте могут также быть реконструированы, что позволяет достигать большой экономии в плане инвестиций. Также можно повторно использовать водные угодья, относящиеся к заброшенным объектам. Такие преимущества в части экономии могут сделать использование существующих объектов для малой гидроэнергетики весьма рентабельными.

Среди экономических, экологических и социальных преимуществ объектов малой гидроэнергетики можно назвать следующие: увеличение энергетической безопасности региона, независимость от поставщика топлива, который может находиться в другом регионе, а также

экономия дефицитного органического топлива. Объект не требует значительных капиталовложений, большого объема строительных материалов и существенных трудозатрат, относительно быстро окупается. Благодаря унификации и сертификации оборудования есть возможность снизить себестоимость возведения сооружения [3].

Основным показателем, который указывает на эффективность использования микро-ГЭС является скорость водного потока. Если скорость меньше 1 м/с, то необходимо принять дополнительные меры по его разгону, например сделать обводной канал переменного сечения или организовать искусственный перепад высот.

В России и за рубежом наиболее часто используется турбина Френсиса, или радиально-осевую турбину. Такой тип гидротурбин характеризуется большим диапазоном рабочих напоров и расходных характеристик, именно это позволило ей занять первые места на рынке [1].

Такие турбины получили название по направлению движения воды. Рабочее колесо состоит из ступицы, верхнего и нижнего обода, лопаток, которые прикреплены к ободам. Способ приготовления колеса может быть как сварным, так и цельнолитым. Конструкция является очень прочной, что позволяет использовать турбину на высоких напорах [2].

Целью настоящей работы была разработка 3D-модели турбины Френсиса для последующего изготовления опытного макета. Модель турбины была выполнена в программе SolidWorks и представлена на рис. 1. Размер модели — $268 \times 234 \times 100$ мм.

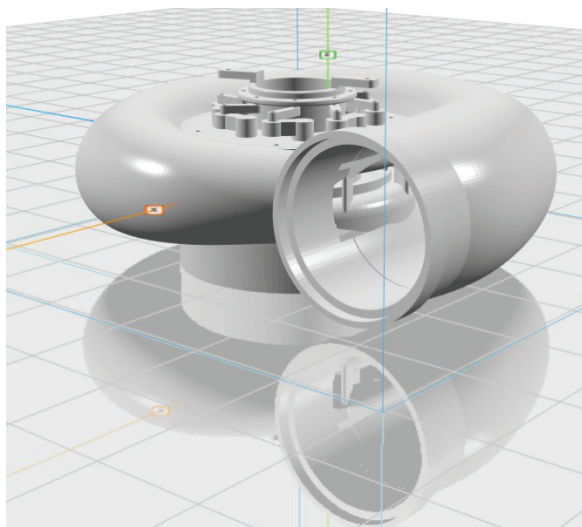


Рис. 1. Модель турбины Френсиса

Планируется проведение эксперимента на р. Чусовой весной 2021 г. Река имеет длину 592 км, средний расход воды — $222 \text{ м}^3/\text{с}$, скорость течения в среднем течении составляет около 2 м/с , что, конечно, не совсем достаточно. Предполагается провести эксперимент в быстрине реки близ д. Верхнемакарово, где скорость течения, согласно измерениям, составляет 5 м/с .

Список источников

1. Гидроэнергетика [Электронный ресурс]. URL: <http://mining-prom.ru/toplivodob/energy/gidroenergetika/> (дата обращения: 10.11.2020).
2. Гидроэнергетика России [Электронный ресурс]. URL: <https://energoseti.ru/articles/gidroenergetika-rossii> (дата обращения: 10.11.2020).
3. Малая гидроэнергетика [Электронный ресурс]. URL: <http://zeleneet.com/malaya-gidroenergetika/1810/> (дата обращения: 10.11.2020).

УДК 621.31

ЗАРЯДНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Д. В. Трякин¹, А. Р. Кудрявцев², С. Э. Монгуш³, П. С. Шуркалов⁴

^{1,2,3,4} Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия

¹ dan.tryakin2010@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены состояние и тенденции развития электротранспорта и его зарядной инфраструктуры. Рассмотрено понятие солнечных и ветряных зарядных станций.

Ключевые слова: энергоэффективность, электротранспорт, аккумуляторы, зарядная инфраструктура, возобновляемые источники энергии

CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

D. V. Tryakin¹, A. R. Kudryavtsev², S. E. Mongush³, P. S. Shurkalov⁴

^{1,2,3,4} National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia

¹ dan.tryakin2010@yandex.ru

Abstract. The paper presents the state and trends in the development of electric transport and its charging infrastructure. The concept of solar and wind charging stations is considered.

Keywords: energy efficiency, electric vehicle, electric transport, batteries, charging infrastructure, renewable energy sources

Ежегодно количество автотранспортных средств в мире постепенно увеличивается. Следствием этого является рост потребления бензина, нефтяного дизельного топлива и загрязнения атмосферы выхлопными газами автомобилей. В связи с этим остро встает вопрос о разработке комплекса мер по экономии жидкого топлива и умень-

шению содержания токсичных веществ в атмосфере. В настоящее время один из способов решения этих проблем — разработка электрических транспортных средств, обладающих отсутствием выбросов вредных выхлопных газов. При этом сразу же возникает проблема эксплуатации таких автомобилей — необходимость развития инфраструктуры зарядных станций, а также станций замены аккумуляторных батарей (АКБ).

Сегодня в мире становится все больше станций подзарядки, работающих от электрической сети. На 1 января 2020 г. в России насчитывалось более 200 станций подзарядки, есть планы расширения сети до 1000 станций [1]. Помимо этого, недавно начали появляться зарядные станции, работающие от возобновляемых источников энергии (ВИЭ): энергии солнца и ветра.

Россия обладает большим потенциалом различных ресурсов возобновляемых источников энергии [2], вследствие этого становится логичным использование ВИЭ для энергоснабжения станций подзарядки электрического транспорта.

Зарядная станция — это электротехническое устройство, оснащенное необходимыми для подключения электромобилей разъемами, коннекторами и позволяющее производить зарядку электромобилей в различных режимах [3].

По скорости зарядки такие станции делятся на два типа, а именно:

1) станции стандартной зарядки — зарядка осуществляется переменным током; время зарядки составляет от 4 до 12 ч в зависимости от режима зарядки и емкости аккумуляторной батареи электрического транспортного средства [4];

2) станции быстрой зарядки — обеспечивают экспресс зарядку электромобиля (15–30 мин.); зарядка электромобилей от этого типа станций осуществляется постоянным током силой до 125 А при напряжении 500 В и мощности до 62,5 кВт.

Несмотря на то что использование электромобилей позволяет снизить выбросы выхлопных газов в городах, снижение уровня выбросов автомобилями будет компенсировано ростом выбросов тепловых электростанций, обеспечивающих в основном электрическую нагрузку [5], в т. ч. городских потребителей. Для того чтобы этот эффект от использования электромобилей не вызывал косвенного роста загрязнения атмосферы, зарядку электротранспорта возможно осуществлять с использованием ВИЭ.

В настоящее время уже есть несколько введенных в эксплуатацию зарядных станций на основе ВИЭ. В зависимости от используемого ресурса такие станции подразделяются на солнечные и ветряные зарядные станции.

Солнечные зарядные станции представляют собой навесы для автомобилей, под которыми установлены зарядные устройства. На этих навесах монтируются фотоэлектрические панели, которые вырабатывают необходимую для зарядки электромобилей электроэнергию. Установленная мощность существующих солнечных зарядных станций варьируется от 500 Вт до более чем 100 кВт. Учитывая, что энергия солнца непостоянна во времени, многие из этих станций имеют подключение к электрической сети или же аккумуляторные батареи для перераспределения энергии во времени [6].

Станции, работающие от энергии ветра, менее распространены в сравнении с солнечными. Однако пример такой станции существует в Испании, ее мощность составляет 4 кВт [7].

В настоящей работе были рассмотрены разные энергоустановки на базе ВИЭ, которые можно использовать для подзарядки электромобилей, а также определены три типа зарядных станций:

- 1) станции, предназначенные для зарядки электромобилей преимущественно в ночное время, расположенные недалеко от жилых домов или ночных общественных заведений;
- 2) станции, предназначенные для зарядки в основном в дневное время, расположенные на автостоянках рядом с жилыми и муниципальными зданиями; а также
- 3) станции, расположенные на автозаправках, используемых как в дневное, так и в ночное время суток.

Также рассмотрено несколько существующих станций замены АКБ [8–10].

Таким образом, по результатам проведенного анализа, был сделан вывод, что применение ресурсов ВИЭ актуально для развития зарядной инфраструктуры электромобилей и полностью совпадает с общемировой тенденцией к росту потребления возобновляемой «чистой» энергии.

Список источников

1. Инфраструктура зарядных станций для электромобилей [Электронный ресурс]. URL: <http://tass.ru/ekonomika/9699549> (дата обращения: 01.12.2020).

2. Мартынов А. С., Семикашев В. В. Эффективность использования ВИЭ, местных видов топлива и вторичных энергоресурсов в регионах России: консолидированный обзор [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/37197400-Konsolidirovanny-obzor-effektivnost-ispolzovaniya-vie-mestnyh-vidov-topliva-i-vtorichnyh-energoresurov-v-regionah-rossii.html> (дата обращения: 02.12.2020).

3. Зарядные станции для электромобилей [Электронный ресурс]. URL: <http://inventory.ru/category/zarjadnye-stancii-dlja-elektromobilej-schneider-electric> (дата обращения: 02.12.2020).

4. Основные типы зарядных станций и разъемов зарядных устройств [Электронный ресурс]. URL: <https://hevcars.com.ua/reviews/zaryazhaem-elektromobil-osnovnyie-tipy-zaryadnyih-stantsiy-i-razemov/> (дата обращения: 03.12.2020).

5. Производство электрической энергии [Электронный ресурс] // М-во энергетики России. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения: 02.12.2020).

6. Автономная зарядная станция для электромобилей [Электронный ресурс]. URL: <https://neosun.com/ru/case/solar-powered-autonomous-charging-station-for-electric-vehicles/> (дата обращения: 03.12.2020).

7. Испания отметилась установкой первой ветряной зарядной станции [Электронный ресурс]. URL: <http://bretagne-auto.ru/zaryadka-elektromobilya/ispaniya-otmetilas-ustanovkoj-pervoj-vetryanoj-zaryadnoj-stancii.html> (дата обращения: 03.12.2020).

8. Аккумуляторы электромобилей: особенности применения [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cars.tech/2020/11/04/akkumulyatory-elektromobilej-osobennosti-primeneniya/> (дата обращения: 03.12.2020).

9. NIO Power Completes 500,000 Battery Swaps [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nio.com/news/nio-power-completes-500000-battery-swaps> (дата обращения: 03.12.2020).

10. Китайцы 500 тысяч раз воспользовались станциями замены аккумулятора электромобиля [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/turbo/nplus1.ru/s/news/2020/06/03/nio> (дата обращения: 03.12.2020).

УДК 697.329

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. С. Чигак¹, С. К. Шерьязов²

^{1,2} Южно-Уральский государственный аграрный университет,
Челябинск, Россия

¹ sakenu@yandex.ru

Аннотация. Представляемые производителем в паспорте солнечной батареи экспериментальные данные об ее электрических и тепловых характеристиках недостаточны для построения основных характеристик. Для возможности исследования характеристик солнечных элементов предложена модель на основе схемы замещения реального элемента с одним диодом и двумя сопротивлениями. Такая модель позволяет определить параметры схемы замещения солнечных элементов и определить их максимальную мощность в зависимости от воздействующих факторов.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, фотоэлектрическая система, солнечный элемент, солнечная батарея, энергетические характеристики

STUDY OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS

A. S. Chigak¹, S. K. Cheryazov²

^{1,2} South-Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

¹ sakenu@yandex.ru

Abstract. The experimental data provided by the manufacturer in the solar battery passport on its electrical and thermal characteristics are not sufficient to construct the main characteristics. For the possibility of studying the characteristics of solar cells, a model based on the substitution scheme of a real element with one diode and two resistances is proposed. This model allows you to determine the parameters of the solar cell replacement scheme and determine their maximum power, depending on the influencing factors.

Keywords: renewable energy, photovoltaic system, solar cell, solar battery, energy characteristics

Приоритетными направлениями в развитии электроэнергетики являются энергосбережение и повышение энергетической эффективности системы. Одним из путей энергосбережения является развитие распределенной генерации, направленное на снижение потери электроэнергии при ее передаче. Более привлекательным источником генерации являются возобновляемые энергоресурсы. Мировая практика показывает, что инвестиции в использование возобновляемой энергии растут быстрее, чем вложенные в генерацию на органических видах топлива. При этом наиболее перспективным возобновляемым источником является солнечная энергия. Наибольшее распространение находит фотоэлектрическая система (ФЭС) на базе солнечных элементов. Исследование и моделирование режимов работы солнечных элементов является важным этапом в определении энергетических показателей ФЭС.

В мире действует огромный парк энергоустановок, преобразующих возобновляемую энергию в другую полезную энергию [1; 2]. Ежегодно вводится больше мощностей генерации на возобновляемой энергии, чем на ископаемых видах топлива. Инвестиции в возобновляемые источники энергии (ВИЭ) примерно в два раза больше, чем в традиционные. Например, в 2017 г. на Китай, Европу и Соединенные Штаты приходилось почти 75 % глобальных инвестиций в ВИЭ, в частности Китай имел высокий уровень капиталовложений в 2017 г. — на 31 % больше, чем в предыдущем [3]. Есть также примеры значительных инвестиций на рынках развивающихся стран, они впечатляют и будут продолжаться.

В развитии распределенной генерации перспективным направлением является строительство солнечной электростанции (СЭС). При этом в ФЭС наибольшее распространение получили солнечные элементы (СЭ) из кремниевых элементов [4; 5].

В условиях развития рынка солнечной электроэнергетики появляется необходимость проведения исследований, связанных с проектированием, разработкой и анализом режимов работы ФЭС. При этом исследование режимов работы солнечных элементов как основного компонента ФЭС является важным этапом в определении его энергетических характеристик. При проектировании ФЭС необходимо получить адекватную модель солнечных батарей (СБ) на основе схемы замещения, описывающую внешние характеристики (ВХ), вольтамперные и вольтваттные характеристики. Для этого необходимо определить основные параметры СБ. Достоверность параметров СЭ зави-

сит от ее типа, используемой технологии и качества их изготовления. Тогда для определения параметров СБ целесообразно использовать данные из технической спецификации СЭ. В паспорте СБ представляются экспериментальные данные об электрических и тепловых характеристиках, которые производитель обязан предоставить в соответствии с требованиями UL (Underwriters Laboratories) — Компании по стандартизации и сертификации в области технической безопасности (США) [6]. В технической документации СБ производитель приводит следующие экспериментальные данные, полученные при стандартных условиях тестирования (STC):

- 1) интенсивность излучения $\lambda = 1000 \text{ Вт/м}^2$;
- 2) солнечный спектр АМ 1,5;
- 3) температура $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 4) номинальная пиковая мощность P_{MPP} , Вт;
- 5) напряжение в точке максимальной мощности V_{MPP} , В;
- 6) ток в точке максимальной мощности I_{MPP} , А;
- 7) напряжение холостого хода V_{OC} , В;
- 8) ток короткого замыкания I_{SC} , А;
- 9) температурный коэффициент в точке холостого хода k_v , В/К;
- 10) температурный коэффициент в точке короткого замыкания k_i , А/К.

Приведенные технические данные СБ недостаточны для построения ВХ, особенно вольтваттной характеристики. При этом значения параметров СБ соответствуют одной величине солнечной радиации и температуре, принятых в качестве эталонных значений. В действительности величина солнечной радиации и ее температура изменяются в широких пределах.

Таким образом, для определения параметров схемы замещения СБ и ее максимальной мощности необходимо создать математическую модель, которая должна воспроизвести режимы работы и энергетические характеристики СБ при изменяющихся условиях эксплуатации. При этом достоверное определение ее параметров и точность моделирования рабочих режимов СБ является актуальной задачей.

Вопросу разработки математических моделей СБ и определению ее параметров посвящен ряд научных исследований [7–10]. В них простейший СЭ представляет собой «бутерброд» из двух полупроводниковых пластин p - и n -типа, которые под действием солнечного излучения генерируют электрический ток.

В самих СБ пластинки кремния соединяются последовательно плоскими проводниками для получения необходимых параметров по току и напряжению. В результате зависимость тока и мощности СБ от напряжения имеет ВХ, приведенную на рис. 1 [5].

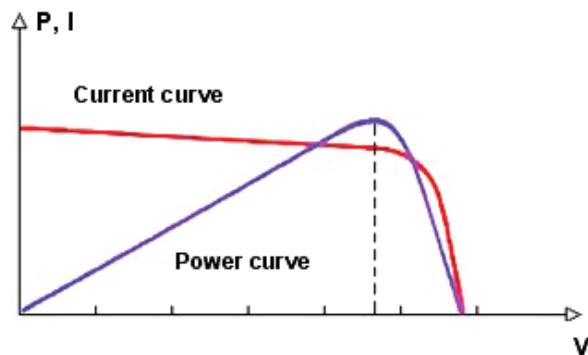


Рис. 1. Внешние характеристики СБ

Для исследования параметров и режимов работы СЭ наибольшее распространение получили математические модели, построенные на основе эквивалентных электрических схем замещения. Известна схема замещения идеального СЭ. На базе схемы замещения идеального СЭ несложно рассчитать его ВХ. Однако проведенные исследования показали невысокую точность моделирования в силу относительной простоты.

В реальных солнечных элементах неизбежны потери энергии, и для повышения точности моделирования предлагается использовать схему замещения, представленную на рис. 2.

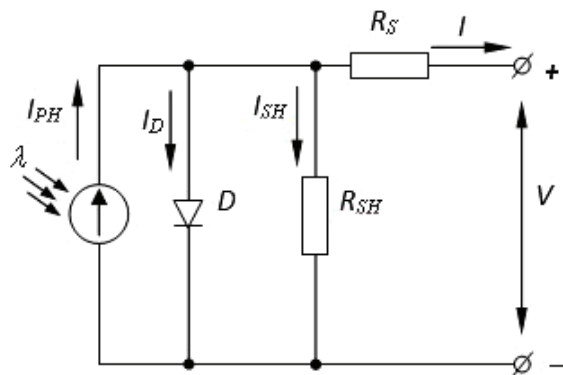


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения реального СЭ

Для такой модели связь тока и напряжения СЭ можно представить в виде уравнения

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} = I_{PH} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}},$$

где A — коэффициент идеальности диода; R_S и R_{SH} — последовательное и параллельное сопротивления СЭ соответственно.

Предлагаемая схема замещения реального СЭ с одним диодом и двумя сопротивлениями является компромиссом между простотой и точностью модели. На практике используются последовательно-параллельные цепочки из большого числа идентичных СЭ для получения заданной мощности на выходе СБ. При этом величина тока из N_S последовательных и N_P параллельно соединенных СЭ определяется как

$$I = N_P \cdot I_{PH} - N_P \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_S)}{N_S \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}},$$

где I , V — ток и напряжение на клеммах СБ; R_S и R_{SH} — эквивалентные сопротивления СБ.

При моделировании режима работы СБ необходимо знать уровень поступающей солнечной энергии и учитывать влияние температуры на энергетические характеристики СЭ. Вместе с этим при повышении температуры СЭ следует ожидать снижение вырабатываемой мощности.

В течение светового дня поступающая солнечная энергия, температура СЭ и связанные с этим энергетические характеристики будут изменчивыми. Это ведет к необходимости учета изменения мощности СБ для оценки ее КПД для точного моделирования режима работы.

Таким образом, распределенная генерация как один из путей энергосбережения предполагает развитие солнечной электроэнергетики. При этом важно знать основные характеристики солнечных элементов, представляющих основу солнечной электрической станции. Важным фактором, влияющим на энергетические характеристики СЭ, является поступающая солнечная энергия и температура его нагрева. При этом с ростом температуры СЭ снижается его КПД и вырабатываемая мощность. Установлено влияние солнечного излучения на нагрев СЭ.

Для исследования характеристик СЭ путем моделирования режима работы предложена простая модель, обеспечивающая достаточную точность моделирования режимов работы СЭ. Использование предла-

гаемой модели позволяет максимально упростить математическое описание объекта исследования. Разработанная модель позволяет определить параметры схемы замещения СЭ и определить максимальную мощность СЭ в зависимости от рассматриваемых факторов

Список источников

1. Sheryazov S. K., Ptashkina-Girina O. S. Estimation of Renewable Energy Resources for Heat Supply Systems [Electronic resource] // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076239 (date of access: 11.11.2020).

2. Sheryazov S. K., Shelubaev M. V., Obukhov S. G. Renewable Sources in System Distributed Generation [Electronic resource] // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076247 (date of access: 11.11.2020).

3. Renewables 2020 Global Status Report [Electronic resource]. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (date of access: 10.12.2020).

4. Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы: в 3-х т. М. : ГНУВИЭСХ, 2009. Т. 1. 120 с.

5. Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Sheryazov S. K. Methods of effective use of solar power system [Electronic resource] // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911015 (date of access: 11.11.2020).

6. Underwriters Laboratories Inc. [Electronic resource]. URL: <http://ul.com/> (date of access: 10.12.2020).

7. Handbook of photovoltaic science and engineering [Electronic resource] / ed. by A. Luque, S. Hegedus. England: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 1167 p. URL: <https://www.pdfdrive.com/handbook-of-photovoltaic-science-and-engineering-e165279962.html> (date of access: 10.12.2020).

8. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications / ed. A. McEvoy, T. Markvart, L. Castaner. Academic Press, 2011. 1268 p.

9. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М. : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

10. Фаренбух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент / пер. с англ. под. ред. М. М. Колтуна. М. : Энергоатомиздат, 1987. 280 с.

УДК 544.6.018.47-039.7

ВЯЗКОСТЬ ХЛОРАЛЮМИНАТНОЙ ИОННОЙ ЖИДКОСТИ 1-БУТИЛ-3-МЕТИЛИМИДАЗОЛИЯ ХЛОРИДА

**В. А. Эльтерман¹, А. В. Бороздин², П. Ю. Шевелин³,
Л. А. Елшина⁴**

^{1,2,3,4} Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ vladimir.elterman@yandex.ru

Аннотация. Получены экспериментальные значения кинематической вязкости ионной жидкости AlCl_3 –1-бутил-3-метилимидазолий хлорид ($[\text{BmIm}]\text{Cl}$) с мольными отношениями $\text{AlCl}_3/[\text{BmIm}]\text{Cl}$ 0,8; 0,9; 1,0; 1,3; 1,7; 2,0 в температурном диапазоне от 0 до 100 °С. Значения кинематической вязкости лежат в диапазоне от 3,148 до 40,959 $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Показано, что кинематическая вязкость уменьшается при увеличении концентрации вводимого AlCl_3 . Можно предположить, что энергия катион-анионного взаимодействия меняется в следующем порядке: $[\text{BmIm}]^+$ и $\text{Al}_2\text{Cl}_7^- < [\text{BmIm}]^+$ и $\text{AlCl}_4^- < [\text{BmIm}]^+$ и Cl^- .

Ключевые слова: ионная жидкость, алюминий-ионный аккумулятор, вязкость

VISCOSITY OF CHLORALUMINATE IONIC LIQUID 1-BUTYL-3-METHYLIMIDAZOLIUM CHLORIDE

V. A. Elterman¹, A. V. Borozdin², P. Yu. Shevelin³, L. A. Yolshina⁴

^{1,2,3,4} Institute of High-Temperature Electrochemistry of the UB of the RAS,
Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ vladimir.elterman@yandex.ru

Abstract. The kinematic viscosity of the AlCl_3 –1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([BMIm]Cl) ionic liquid with AlCl_3 /[BMIm]Cl molar ratios — 0,8; 0,9; 1,0; 1,3; 1,7; 2,0 were measured in the temperature range from 0 to 100 °C. The kinematic viscosity values are in the range from 3,148 to 40,959 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. It is shown that the kinematic viscosity decreases with an increase in the introduced AlCl_3 concentration. It can be assumed that the energy of the cation-anionic interaction changes in the following order: $[\text{BMIm}]^+$ and $\text{Al}_2\text{Cl}_7^- < [\text{BMIm}]^+$ and $\text{AlCl}_4^- < [\text{BMIm}]^+$ and Cl^- .

Keywords: ionic liquid; aluminium-ion battery; viscosity

Алюминий-ионный аккумулятор открывает большие перспективы в аккумуляторной промышленности. В настоящее время теоретическая емкость алюминиевой аккумуляторной батареи составляет $8046 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{см}^{-3}$, что в 3–4 раза превышает емкость литий-ионных аккумуляторов ($2062 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{см}^{-3}$) [1]. Она также демонстрирует сверхвысокие скорости заряда и разряда батарей, низкую стоимость и низкую воспламеняемость. Алюминий занимает первое место по распространенности в земной коре среди металлов. Перспективным электролитом для алюминий-ионного аккумулятора является хлоралюминатная ионная жидкость (ИЖ) 1-бутил-3-метилимидазолий хлорид (AlCl_3 /[BMIm]Cl). Одним из преимуществ такой ИЖ над 1-этил-3-метилимидазолий хлорид ([EMIm]Cl) является более низкая температура плавления. Для индивидуальных солей [BMIm]Cl и [EMIm]Cl температуры плавления равны 65 и 84 °C соответственно [2].

Вязкость ИЖ оказывает существенное влияние на значения ее электропроводности. Это показано произведением Вальдена, которое находится достаточно в узком диапазоне для ИЖ с разными катионами и анионами [3]. По этой причине целью настоящей работы является измерение вязкости хлоралюминатной ИЖ 1-бутил-3-метилимидазолий хлорида в широком концентрационном диапазоне, при молярном отношении AlCl_3 /[BMIm]Cl (N) от 0,8 до 2,0 в температурном диапазоне от 0 до 100 °C.

Измерение вязкости проводили с помощью стеклянных капиллярных вискозиметров с разными диаметрами капилляра (в зависимости от значения вязкости ИЖ) для определения вязкости непрозрачных жидкостей с известными постоянными вискозиметра. Вискозиметр заполняли исследуемой ИЖ до определенной метки без образования пузырьков аргона в объеме вискозиметра. Вискозиметр устанавли-

ливали вертикально в нагревательную печь с кварцевыми окошками с подсветкой внутри бокса (MBraun UniLab) и в охлаждаемый водно-спиртовой раствор при охлаждении на воздухе. По времени течения жидкости, установленному с помощью секундомера, рассчитывали кинематическую вязкость исследуемых ИЖ. На рис. 1 приведены экспериментальные температурные зависимости кинематической вязкости исследуемой ИЖ при $N = 0,8; 0,9; 1,0; 2,0$.

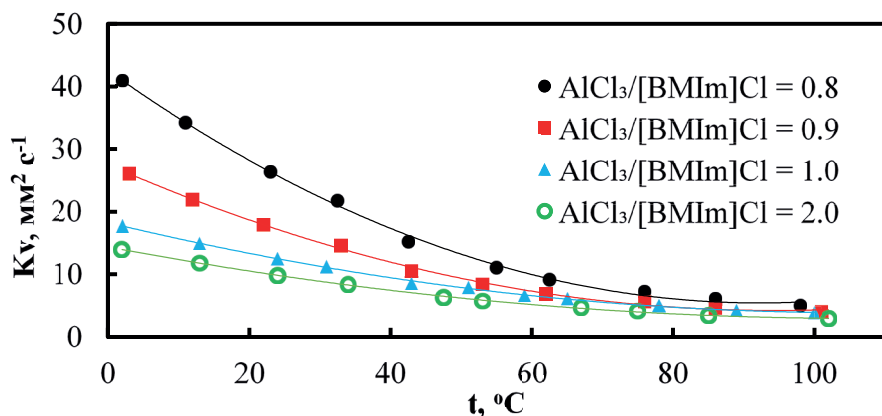


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости ИЖ $\text{AlCl}_3\text{—}[\text{BMIm}]\text{Cl}$ от температуры при $N = 0,8; 0,9; 1,0; 2,0$

Значения кинематической вязкости лежат в диапазоне от 3,148 до 40,959 $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для исследуемых составов при температурах от 0 до 100 $^\circ\text{C}$. Вязкость каждой ИЖ резко снижается при повышении температуры. Это предполагает, что повышение температуры снижает внутреннее сопротивление потоку ИЖ, а внутреннее сопротивление в основном зависит от катион-анионного взаимодействия ИЖ, которое уменьшается с ростом температуры.

На рис. 2 приведены изотермы кинематической вязкости ИЖ $\text{AlCl}_3\text{—}[\text{BMIm}]\text{Cl}$ для температур 0, 25, 50 и 100 $^\circ\text{C}$ в зависимости от концентрации AlCl_3 , на которых наблюдается ее уменьшение при увеличении концентрации вводимого AlCl_3 . Можно предположить, что энергия катион-анионного взаимодействия меняется в следующем порядке: $[\text{BMIm}]^+$ и $\text{Al}_2\text{Cl}_7^- < [\text{BMIm}]^+$ и $\text{AlCl}_4^- < [\text{BMIm}]^+$ и Cl^- . Таким образом, изменение концентрации анионов приводит к уменьшению вязкости с увеличением концентрации AlCl_3 , т. к. в щелочных ИЖ

($N < 1$) наблюдается уменьшение концентрации Cl^- и увеличение концентрации AlCl_4^- , а в кислотных ИЖ ($N > 1$) — уменьшение концентрации AlCl_4^- и увеличение концентрации Al_2Cl_7^- .

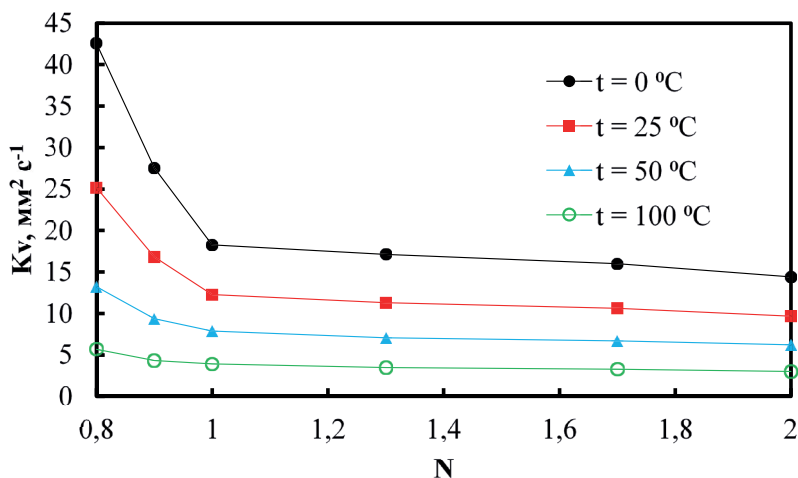


Рис. 2. Зависимость кинематической вязкости ИЖ AlCl_3 – $[\text{BMIm}]\text{Cl}$ от мольной доли хлорида алюминия при температурах 0, 25, 50 и 100 °C

Получены экспериментальные значения кинематической вязкости ИЖ в исследуемых концентрационном и температурном диапазонах капиллярным методом. Значения кинематической вязкости лежат в диапазоне от 3,148 до 40,959 $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Вязкость каждой ИЖ резко снижается при повышении температуры. Это предполагает, что повышение температуры снижает внутреннее сопротивление потоку ИЖ. Показано, что кинематическая вязкость уменьшается при увеличении концентрации вводимого AlCl_3 . Можно предположить, что энергия катион-анионного взаимодействия меняется в следующем порядке: $[\text{BMIm}]^+$ и $\text{Al}_2\text{Cl}_7^- < [\text{BMIm}]^+$ и $\text{AlCl}_4^- < [\text{BMIm}]^+$ и Cl^- .

Список источников

1. Cathode materials for rechargeable aluminum batteries: current status and progress [Electronic resource] / Z. A. Zafar [et al.] // J. Mater. Chem. A. 2017. Vol. 5, Iss. 12. P. 5646–5660. DOI: 10.1039/C7TA00282C (date of access: 10.11.2020).

2. Properties of 1,3-dialkylimidazolium chloride-aluminum chloride ionic liquids. 2. Phase transitions, densities, electrical conductivities, and viscosities [Electronic resource] / A. A. Fannin [et al.] // J. Phys. Chem. 1984. Vol. 88. P. 2614–2621. DOI: 10.1021/j150656a038 (date of access: 10.11.2020).

3. Galinski M., Lewandowski A., Stepniak I. Ionic liquids as electrolytes [Electronic resource] // Electrochim. Acta. 2006. Vol. 51, Iss. 26. P. 5567–5580. DOI: 10.1016/j.electacta.2006.03.016 (date of access: 10.11.2020).

Раздел 4

Атомная энергетика. Ядерные
энергетические установки:
проектирование, эксплуатация,
вывод из эксплуатации

УДК 621.039

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС

**Д. А. Агеев¹, Д. Н. Орлов², Т. Д. Торопов³,
М. А. Вольман⁴, М. Н. Мечтаева⁵**

^{1,2,3,4,5} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

⁵ maria.mechtaeva@mail.ru

Аннотация. В работе представлен способ снижения затрат энергии на собственные нужды атомной электрической станции путем создания моделей оборудования систем собственных нужд, анализа и совершенствования режимов его эксплуатации. В качестве основного инструмента решения поставленных задач рассмотрены технологии нейросетевого моделирования и их аналоги. Применение результатов работы при модернизации существующих агрегатов и в ходе проектирования нового оборудования позволит повысить эффективность выработки электрической энергии на энергоблоке станции.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, собственные нужды, эффективность, нейросетевое моделирование

INCREASING THE ENERGY, ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF NUCLEAR POWER PLANT

**D. A. Ageev¹, D. N. Orlov², T. D. Toropov³,
M. A. Volman⁴, M. N. Mechtaeva⁵**

^{1,2,3,4,5} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

⁵ maria.mechtaeva@mail.ru

Abstract. The paper presents a method for reducing energy consumption for auxiliary needs of a nuclear power plant by creating models of equipment for auxiliary systems, analyzing and improving its operation modes. Neural network modeling technologies and their analogues are considered as the main tool for solving the set

tasks. The application of the work results during the modernization of existing units and during the design of new equipment will increase the efficiency of electric power generation at the power unit of the power plant.

Keywords: nuclear power plant, auxiliary needs, efficiency, neural network modeling

В настоящее время особую актуальность приобрел вопрос эффективной и безопасной эксплуатации действующего оборудования атомных электростанций (АЭС). Большинство установленных на действующих АЭС РФ агрегатов были спроектированы в 50–70 гг. XX в. в соответствии с уровнем научно-технологического развития того времени. Экономический кризис, длившийся с конца 1980-х до 2000-х гг., не позволил уделить должного внимания созданию нового оборудования и модернизации существующего. Таким образом, морально устаревшее оборудование, подверженное естественному износу, не может быть эффективным и конкурентоспособным в современных реалиях.

В последнее десятилетие издан ряд нормативно-правовых документов, направленных на решение проблемы энергоэффективности в различных отраслях промышленности: 1) федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ; 2) ГОСТ Р ИСО 50001–2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» и др. В 2014 г. «Росэнергоатом» прошел успешную сертификацию на требования международного стандарта ISO 50001.

Внедрение этого стандарта обязывает администрации атомных станций проводить мероприятия по улучшению энергоэффективности, энергобезопасности и энергопотребления. В энергетической политике компании «Росэнергоатом» для каждой атомной электростанции сформулированы стратегические цели, направленные на снижение затрат тепловой и электрической энергии, отпускаемой на собственные и хозяйственные нужды станции.

В рамках программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности важной задачей становится проведение технологических мероприятий по оптимизации работы оборудования и систем. Это позволит увеличить выработку электрической энергии при сохранении или снижении уровня эксплуатационных затрат, отпускаемых на работу атомной электрической станции.

В настоящее время для увеличения выработки электроэнергии на АЭС проводится ряд мероприятий по повышению эффективности работы оборудования собственных нужд путем анализа и совершенствования режимов его эксплуатации [1].

Объектом исследования в рамках выполняемой работы является оборудование второго контура энергоблоков атомных электрических станций (турбопитательные насосы, вакуумная система, системы регенеративного подогрева).

Целью работы является разработка специализированного программного средства, позволяющего выполнять анализ работы оборудования систем питательных турбонасосов, регенеративного подогрева, вакуумной системы с использованием технологий нейросетевого моделирования и формирующего рекомендации для оперативного персонала, направленные на оптимизацию потребления энергии оборудованием.

Способы повышения эффективности эксплуатации подразумевают исследование работы оборудования или его модели в различных эксплуатационных ситуациях, сопровождаемых изменением режимных параметров в широком диапазоне [2]. Среди имеющихся подходов к созданию моделей работы тепломеханического оборудования электрических станций рассмотрены следующие методы: регрессионный анализ, детерминированные методы моделирования, физический модельный эксперимент, натурный активный эксперимент, нейросетевое моделирование. Сравнение перечисленных подходов проводилось по следующим критериям: стоимость создания модели, стоимость работы с моделью, трудоемкость и требования к квалификации исследователя, точность моделирования и возможный диапазон исследуемых параметров.

Метод нейросетевого моделирования [3] обладает достаточной точностью для решения задач, поставленных в рамках работы, не требуя при этом значительных материальных затрат на его применение.

Преимуществом использования нейросетевой технологии при обработке информации для каждого агрегата является учет особенностей его эксплуатации с высокой степенью точности. Нейросетевая модель способна спрогнозировать поведение оборудования при изменении различных эксплуатационных данных во времени с погрешностью, не превышающей 2 %.

Используя полученные нейросетевые модели, в любых эксплуатационных условиях может быть подобран комплекс тепломеханиче-

ских параметров, при которых агрегат будет работать с наибольшей эффективностью [4].

Такая технология даст возможность повышения качества проводимого анализа работы тепломеханического оборудования АЭС, определения технически обоснованных норм расхода энергии на агрегаты, поиска оптимальных режимов эксплуатации оборудования АЭС, что, в свою очередь, снизит себестоимость отпускаемой электроэнергии.

Список источников

1. К вопросу о повышении эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / Н. А. Лоншаков [и др.] // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. XXII Международ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М. : МЭИ, 2016. Т. 3. С. 24.
2. Дунаев В. А., Лоншаков Н. А., Горбунов В. А. К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС // Глоб. ядер. безопасность. 2015. № 2 (15). С. 63–70.
3. Горбунов В. А. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок. Иваново : Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2011. 475 с.
4. Горбунов В. А., Лоншаков Н. А., Дунаев В. А. Повышение эффективности работы тепломеханического оборудования АЭС с использованием нейросетевых технологий // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения) : материалы Международ. науч.-техн. конф. Иваново : ИГЭУ, 2015. Т. 2. С. 51–54.

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ ВЛАГИ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1000М РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000

Д. А. Агеев¹, В. Ф. Степанов²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

² stulik05@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен процесс моделирования сепарации влаги в парогенераторе ПГВ-1000 М и возможность применения настоящей модели при разработке парогенераторов АЭС и исследовании происходящих в них процессов.

Ключевые слова: парогенератор, моделирование, исследование, сепарация

MODELING THE PROCESSES OF MOISTURE SEPARATION IN THE PGV-1000M STEAM GENERATOR OF A VVER-1000 REACTOR

D. A. Ageev¹, V. F. Stepanov²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

² stulik05@mail.ru

Abstract. The paper considers the process of modeling moisture separation in the PGV-1000M steam generator, and the possibility of using this model in the development and research of NPP steam generators.

Keywords: steam generator, modeling, research, separation

В состав первого контура реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000 входят горизонтальные парогенераторы (ПГ). Они являются важнейшим компонентом энергоблока, т. к. связывают первый (радиоактивный) и второй (безопасный) контур. По этой причине надежность работы такого оборудования должна находиться на высоком уровне.

ПГ представляет собой теплообменное устройство, предназначенное для выработки пара необходимых параметров [1]. Качество пара

является одним из важных эксплуатационных параметров парогенератора. Степень качества пара, производимого ПГ, определяют по его влажности на выходе из ПГ. Влажность не должна превышать установленного значения в 0,2 % по массе пара [2]. Повышенные значения этого показателя приводят к заносу солями проточной части турбин, эрозии паровпускных устройств и лопаток турбин, а также к снижению КПД турбин. Следовательно, обеспечение требуемых значений влажности пара на выходе из ПГ является важной задачей проектирования и эксплуатации такого оборудования.

В рамках формализованных шаблонов программного пакета Ansys CFX разработан аналог системы сепарации влаги в парогенераторе ПГВ-1000 М. Настоящая модель имеет возможность определения влияния гравитации, высоты парового пространства, паровой нагрузки и параметров погруженного дырчатого листа на сепарацию влаги. При решении поставленной задачи в качестве базовой модели использовались уравнения сохранения массы и движения для парокапельной смеси с допущениями модели гомогенного двухфазного потока, а также система уравнений Навье — Стокса для течения вязкой сжимаемой жидкости и уравнение неразрывности.

В программном комплексе Ansys CFX для решения поставленной задачи используется метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на конечное число элементов, и для каждого элемента решаются дифференциальные уравнения численным методом [3]. Объектом имитационного моделирования являлся паровой объем ПГ, ограниченный зеркалом испарения и корпусом ПГ. При проведении вычислительных экспериментов определено распределение абсолютного давления пара в корпусе ПГ, проведена оценка параметров погруженного дырчатого листа на распределение скоростей влаги в паровом пространстве, визуализированы потоки пара и влаги, а также было получено распределение концентрации влаги в паровом пространстве. Выполнен сравнительный анализ параметров погруженного дырчатого листа с рекомендациями ряда экспериментальных исследований, который подтвердил правомерность принятого в работе модельного подхода. Проведен анализ надежности системы сепарации влаги [4].

Созданная математическая модель может быть успешно применена для исследования процессов сепарации влаги в парогенераторах и барабан-сепараторах РУ АЭС.

Список источников

1. Сепарационные устройства АЭС / А. Г. Агеев [и др.]. М. : Энергоиздат, 1982. 169 с.
2. Маргулова Т. Х. Расчет и проектирование парогенераторов атомных электростанций. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. 144 с.
3. ANSYS Help [Electronic resource]. URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата обращения: 01.12.2020).
4. Федоров Л. Ф., Рассохин Н. Г. Процессы генерации пара на атомных электростанциях. М. : Энергоатомиздат, 1985. 288 с.

УДК 621.039

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕТОНОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ БАРИТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

**М. В. Аладаилах¹, И. А. Ширманов², Е. Д. Стругов³,
В. А. Климова⁴, О. Л. Ташлыков⁵**

^{1,2,3,4,5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ aladailehmotaz@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты исследований поглощающих свойств бетона с различным содержанием барита в его составе в диапазоне энергии гамма-излучения от 1 кэВ до 2 МэВ. Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения были рассчитаны с помощью базы данных NIST XCOM. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными рядом авторов.

Ключевые слова: гамма-излучение, массовый коэффициент ослабления, XCOM, защита от гамма-излучения

ON THE POSSIBILITY OF THE USAGE OF CONCRETE WITH THE ADDITION OF BARITE FOR GAMMA RADIATION PROTECTION

**M. W. Aladailah¹, I. A. Shirmanov², E. D. Strugov³,
V. A. Klimova⁴, O. L. Tashlikov⁵**

^{1,2,3,4,5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ aladailehmotaz@gmail.com

Abstract. The paper presents the studies' results of the gamma-ray absorbing properties of concrete with different barite content in its composition in energy range from 1 Kev to 2 MeV. The mass attenuation coefficients of gamma radiation were calculated using the NIST XCOM database. The calculation results were compared with the experimental data of several authors.

Keywords: Gamma radiation, photon attenuation, XCOM, gamma-radiation protection

В настоящее время широкое использование источников ионизирующего излучения неразрывно связано с проблемами радиационной безопасности и задачами проектирования и создания биологических защит. В процессе строительства объектов атомной энергетики необходимо учитывать множество критериев, основными из которых являются устойчивость к ионизирующему излучению.

Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может достигать 20–30 % общей стоимости сооружения [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает реализация одного из основных принципов радиационной безопасности — принципа оптимизации — применительно к составу биологической защиты. Использование бетона, в состав которого входит барит (BaSO_4), может быть перспективным при сооружении биологической защиты объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

В настоящей работе исследовалось ослабление гамма-излучения как бетонами типовых марок, так и бетонами с различным содержанием барита в его составе. Рассчитывались значения массовых коэффициентов ослабления, а также были получены расчетные значения плотности бетонов. Процентное содержание веществ, входящих в состав бетонов, представлено в таблице.

Таблица

Основные вещества, входящие в состав бетона, % масс.

Материалы	Образцы бетонов					
	1	2	3	4	5	6
Цемент	13,5	15,5	18,1	9,3	10,8	12,7
Вода	8,7	7,9	7,8	6,0	5,5	5,5
Мелкодисперсный наполнитель (песок)	30,3	29,8	28,9	0,0	0,0	0,0
Крупный наполнитель (щебень)	47,5	46,8	45,2	0,0	0,0	0,0
Концентрат баритовый (крупный)	0,0	0,0	0,0	33,5	33,1	32,4
Концентрат баритовый (мелкий)	0,0	0,0	0,0	51,1	50,6	49,4
Плотность, кг/м^3	2406	2464	2482	3414	3507	3452

Для определения массового коэффициента ослабления использовалась база данных NIST XCOM [2], с помощью которой можно по-

лучить сечения рассеяния для фотонов, фотоэлектрическое поглощение и образование пар, а также общих коэффициентов затухания для любого элемента, соединения или смеси.

Для сравнения радиационно-защитных свойств материалов обычно используется линейный коэффициент ослабления, потому что существует простая по форме зависимость между кратностью ослабления излучения и толщиной защитного слоя [1]. Линейный коэффициент ослабления рассчитывался по формуле:

$$\mu = \mu_m \rho,$$

где μ_m — массовый коэффициент ослабления, $\text{см}^2/\text{г}$; ρ — плотность исследуемого бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Расчетные значения, полученные с помощью NIST XCOM, сравнивались с экспериментальными данными, полученными при исследовании бетонов с аналогичным составом для энергий гамма-излучения 0,66 и 1,25 МэВ [3].

На рис. 1 показаны значения линейных коэффициентов ослабления для типовых сортов бетона (1–3) и бетонов, в состав которых входит барит (4–6). Эти значения были рассчитаны при энергиях фотона 0,66 и 1,25 МэВ, для сравнения с данными [3].

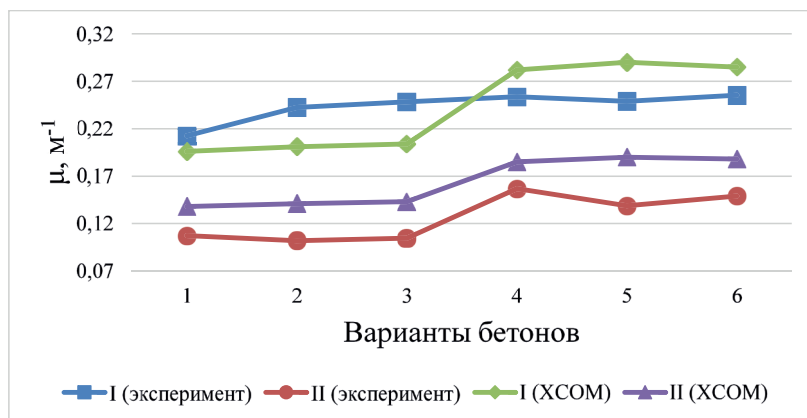


Рис. 1. Коэффициенты линейного ослабления для бетонов: I — для энергии фотонов 1,25 МэВ; II — для энергии фотонов 0,66 МэВ

Исследованы связи между физическими параметрами, такими как процентное отношение воды и цемента, плотность и компрессионная прочность бетонов, а также массовые коэффициенты ослабления.

Сравнение проводилось между стандартными бетонами и бетонами, в состав которых входит барит. Данные для сравнения взяты из работы о защите от гамма-излучения с помощью бетонов из барита [3].

По итогам работы можно сделать вывод, что бетоны, имеющие барит в составе, имеют большие коэффициенты линейного ослабления. Такие бетоны были рассмотрены в качестве защитного строительного материала при действии на него гамма-излучения. Определена эффективность использования барита в составе бетона для защиты от гамма-излучения. Каждый образец бетона с баритом (В2, В3, В4) имеет разную плотность, что влияет на линейный коэффициент ослабления. Из результатов сравнения видно, что бетон с использованием барита является более эффективным материалом для защиты от гамма-излучения по сравнению со стандартными бетонами.

Эффективность применения барита в составе бетона показала увеличения коэффициента линейного ослабления в среднем на 25 % для энергии 0,66 МэВ и на 29,8 % для энергии 1,25 МэВ соответственно.

Список источников

1. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений. М. : Энергоатомиздат, 1995. 495 с.
2. NIST XCOM. База данных национального института стандартов и технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (дата обращения: 10.11.2020).
3. The shielding of γ -rays by concretes produced with barite [Electronic resource] / I. Akkurt [et al.] // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46 (1). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015> (date of access: 10.11.2020).

УДК 621.039

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ Bi_2O_3 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛА

**М. В. Аладаилах¹, И. А. Ширманов², Е. Д. Стругов³,
О. Л. Ташлыков⁴**

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ strugov.zhora@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрено влияние содержания Bi_2O_3 на механические и радиационно-защитные свойства стекол состава $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{—MoO}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—Fe}_2\text{O}_3$. Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения были определены с помощью базы данных NIST XCOM. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными рядом авторов.

Ключевые слова: защитные свойства, массовый коэффициент ослабления, линейный коэффициент ослабления, висмут

INFLUENCE OF Bi_2O_3 CONTENT ON MECHANICAL AND RADIATION-PROTECTIVE PROPERTIES OF GLASS

M. W. Aladailah¹, I. A. Shirmanov², E. D. Strugov³, O. L. Tashlikov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ strugov.zhora@mail.ru

Abstract. The influence of Bi_2O_3 content on the mechanical and radiation-protective properties of glasses of The $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{—MoO}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—Fe}_2\text{O}_3$ composition is considered. The mass coefficients of gamma radiation attenuation were determined using the NIST XCOM database. The calculation results are compared with the experimental data of a number of authors.

Keywords: shielding properties, mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, bismuth

Защита от ионизирующего излучения для работников и оборудования объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) всегда оставалась актуальной проблемой. В наши дни в качестве биологической защиты от излучения на ОИАЭ и в местах захоронения радиоактивных отходов используется высококачественный бетон. В ряде случаев в качестве защиты от излучения используется стекло, которое должно эффективно ослаблять гамма-излучение и быть прозрачным для видимого света.

Для определения массового коэффициента ослабления использовалась база данных NIST XCOM [1], с помощью которой можно получить сечения рассеяния для фотонов, фотоэлектрическое поглощение и образование пар, а также общих коэффициентов затухания для любого элемента, соединения или смеси. Основной химический состав элементов представлен в таблице.

Таблица

Основной химический состав материалов, % масс.

Исследуемые образцы	Химические элементы, %						ρ , г/см ³
	Bi ₂ O ₃	MoO ₃	B ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	
1	15	15	40	20	9	1	3,053
2	17,5	12,5	40	20	9	1	3,198
3	20	10	40	20	9	1	3,368
4	25	5	40	20	9	1	3,512

Для сравнения радиационно-защитных свойств материалов использовались линейные коэффициенты ослабления, рассчитанные по формуле:

$$\mu = \mu_m \rho,$$

где μ_m — массовый коэффициент ослабления, см²/г; ρ — плотность исследуемого бетона, г/см³.

Рассчитанные значения, полученные с помощью NIST XCOM, сравнивались с экспериментальными данными, полученными при исследовании различных составов стекол со схожим составом для энергии гамма-излучения в диапазоне от 0,015 до 2 МэВ [2].

На рис. 1 и 2 приведены значения линейных коэффициентов ослабления для исследуемых составов стекол рассчитанных с помощью базы данных NIST XCOM и определенных экспериментально. Изме-

рения массового коэффициента ослабления были проведены для четырех образцов G1, G2, G3, и G4 с добавками Bi_2O_3 .

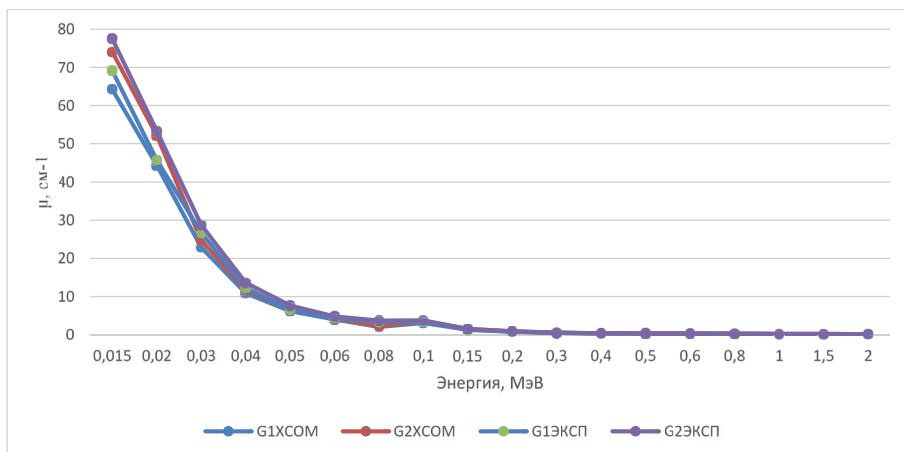


Рис. 1. Коэффициент линейного ослабления для образцов G1, G2

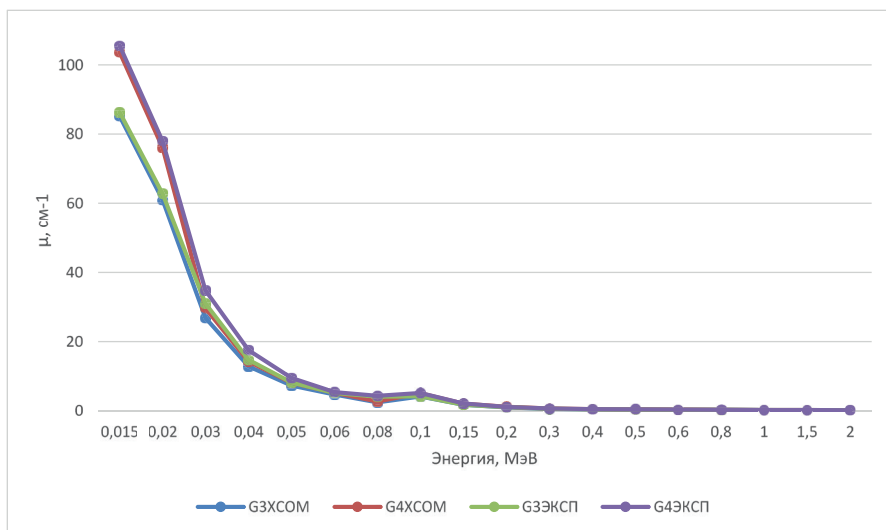


Рис. 2. Коэффициент линейного ослабления для образцов G3, G4

Сравнение значений массовых коэффициентов ослабления четырех образцов стекла состава $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{—MoO}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—Fe}_2\text{O}_3$ с различными добавками Bi_2O_3 с использованием базы данных NIST XCOM и экспериментальных данных [2] показало хорошую сходимость

результатов. Максимальное различие расчетных и экспериментальных результатов составляет от десятых долей процента до 9,5 %.

Список источников

1. Effect of Bi_2O_3 content on mechanical and nuclear radiation shielding properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{—MoO}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—Fe}_2\text{O}_3$ glass system [Electronic resource] / A. M. Issaa Shams [et al.] // Results in Physics. 2019. Vol. 13. 102165. DOI: 10.1016/J. RINP.2019.102165 (date of access: 10.11.2020).
2. NIST XCOM. База данных национального института стандартов и технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (дата обращения: 10.11.2020).

УДК 621.81

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ АЭС

**А. М. Балдин¹, А. В. Куртеев², К. Е. Орлов³,
М. М. Севастьянов⁴, О. Л. Ташлыков⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ mikas45@mail.ru

Аннотация. В работе представлена разработанная и сконструированная система мониторинга напряженно-деформированного состояния металлоконструкции и принцип ее работы. Приведены результаты экспериментов, проведенных в рамках настоящей работы, проверена работоспособность системы, определена ее чувствительность, построены функции зависимости показаний системы от механических напряжений. Подтверждена возможность применимости разработанной системы для мониторинга состояния элементов АЭС в рамках обеспечения надежности и безопасности.

Ключевые слова: безопасность АЭС, неразрушающие методы контроля, мониторинг, магнитная проницаемость, металлоконструкции

SYSTEM OF STRESS-STRAIN BEHAVIOR MONITORING OF METAL STRUCTURES OF NPP

**A. M. Baldin¹, A. V. Kurteev², K. E. Orlov³,
M. M. Sevastyanov⁴, O. L. Tashlykov⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ mikas45@mail.ru

Abstract. The developed and constructed system for monitoring the stress-strain behavior of a metal structures and the principles of its operation have been presented. The results of carried out experiments have been presented, the operability of the system and the reliability of its readings have been confirmed and the dependences

of the monitoring system's readings on the mechanical loading has been obtained. The applicability of the developed system for monitoring of condition of NPP elements for safety and reliability assurance has been confirmed.

Keywords: NPP safety, non-destructive testing methods, monitoring, magnetic permeability, metal structures

Общей целью обеспечения безопасности при эксплуатации атомной станции (АС) является надежная защита населения и окружающей среды от недопустимого радиационного воздействия. Основной целью технической безопасности является предотвращение с высокой степенью надежности возникновения аварий и крупных неполадок на АС [1]. Важную роль для обеспечения безопасности атомной электростанции (АЭС), своевременного принятия мер по предотвращению отказов и аварийных ситуаций играют системы диагностики и мониторинга состояния оборудования, трубопроводов и сооружений на всех этапах жизненного цикла АЭС. Техническое диагностирование должно проводиться в процессе эксплуатации и ремонта в целях поддержания установленного уровня надежности, обеспечения требований безопасности и эффективности использования оборудования и должно быть направлено на решение следующих взаимосвязанных задач:

- 1) определение вида технического состояния;
- 2) поиск места отказа или неисправностей;
- 3) прогнозирование технического состояния.

Безопасность эксплуатации во многом зависит от качества технического обслуживания и ремонта систем и оборудования АС. Техническое обслуживание и ремонт систем и оборудования осуществляются в целях поддержания их технического состояния и надежности на заданном уровне, обеспечения соответствия атомной станции требованиям безопасности в течение всего срока эксплуатации [2].

В последние годы большой интерес проявляется к магнитным методам контроля, основанных на связи магнитных параметров конструкций с механическим напряжением металла. Подобные методы оценки механического напряжения и напряженно-деформированного состояния (НДС) металла обладают рядом важных преимуществ по сравнению с другими методами контроля. Это неразрушающее действие и возможность осуществления контроля практически при

любых условиях эксплуатации исследуемого оборудования и дистанционного контроля с мониторингом НДС металла в процессе его эксплуатации.

Наиболее важным является применение подобного метода контроля при диагностике корпусного оборудования и металлоконструкций, обладающих значительными габаритными размерами и металлоемкостью (объекты энергетики, добычи нефти и газа, сети трубопроводов различного назначения и т. д.), для которых ранняя диагностика повреждений металла существенно снижает риски их внезапного разрушения, последствия которых наносят существенный ущерб экономике и окружающей среде [3].

Настоящие проблемы могут быть решены при использовании магнитного контроля НДС металла, основанного на применении эффекта Форстера, согласно которому магнитная проницаемость образца металлоконструкции зависит от направления и интенсивности действующих в образце механических напряжений, обладающего высокой магнитоупругой чувствительностью и локальностью контроля НДС металла стального изделия, металлоконструкции [4].

В связи с этим было произведено исследование, разработана конструкция устройства и методика локального магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла, в частности элементов корпусного оборудования и металлоконструкций.

Предлагаемое устройство мониторинга напряженно-деформированного состояния металлоконструкций (рис. 1) позволяет выполнять измерения в условиях двухосного напряженного состояния, что позволяет определять направление и величину как статических, так и динамических нагрузок, благодаря чему появляется возможность мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, мостов, зданий, оборудования и т. д.

Методы магнитного контроля металлических элементов и конструкций являются неотъемлемой частью обеспечения безопасности при эксплуатации и ремонте АЭС и других промышленных объектов. Метод мониторинга НДС, основанный на использовании эффекта Форстера, действительно является одним из наиболее перспективных методов такого типа на данный момент. В рамках этого исследования была разработана и построена такая система мониторинга НДС.



Рис. 1. Устройство для мониторинга напряженно-деформированного состояния металлоконструкций АЭС

По результатам проведенных экспериментов такая система мониторинга показала работоспособность, стабильность, точность и пропорциональность показаний в зависимости от механической напряженности проверяемых конструкций. Благодаря этим качествам предлагаемая система мониторинга НДС может быть эффективно использована на объектах, где требуется высокоточный контроль напряженно-деформированного состояния.

Список источников

1. Константинов В. Д. Техническая эксплуатация АЭС и ПНК. М. : МГТУ ГА, 2013. С. 17–21.
2. Агинеи Р. В., Теплинский Ю. А., Кузьбожев А. С. Оценка напряженного состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 22–24.
3. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля / С. Г. Сандомирский [и др.] // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 27–31.
4. Акустические методы и средства исследования напряженно-деформированного состояния металла конструкций и сооружений / А. А. Самокрутов [и др.] // В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1 (27). С. 22–26.

УДК 621.039

ОЧИСТКА НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ ОТ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ

И. А. Бессонов¹, С. В. Чалпанов², О. Л. Ташлыков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ilja.bessonov2014@yandex.ru

Аннотация. Показано преимущество использования цезиевых ловушек при выводе из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах. Описан опыт их использования на БН-350 и рассмотрена возможность очистки натрия первого контура БН-600 аналогичным способом.

Ключевые слова: изотопы цезия, реакторы на быстрых нейтронах, натрий, вспененный углерод

PURIFICATION OF FAST REACTORS PRIMARY SODIUM COOLANT FROM CESIUM RADIONUCLIDES

I. A. Bessonov¹, S. V. Chalpanov², O. L. Tashlykov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ilja.bessonov2014@yandex.ru

Abstract. The advantage of using cesium traps in the decommissioning of fast reactors is shown. The experience of their use on the BN-350 is described and the possibility of purifying the sodium of the BN-600 primary circuit in the same way is considered.

Keywords: cesium isotopes, fast reactors, sodium, foamed carbon

В настоящее время окончательно остановлены три энергоблока Нововоронежской атомной электростанции (АЭС), по два — Белоярской и Ленинградской АЭС, один энергоблок Билибинской АЭС.

В ближайшее время будут выводиться из эксплуатации блоки АЭС, запущенные в эксплуатацию в 1970–1980-е гг. с учетом продления их проектного срока эксплуатации, в т. ч. 3-й энергоблок Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах.

Особенностью вывода из эксплуатации БН-600 от реакторов ВВЭР и РБМК является наличие больших объемов натрия.

Важной задачей при выводе АЭС из эксплуатации является очистка натрия от цезия (^{134}Cs , ^{137}Cs), определяющего радиационную обстановку в первом контуре при работе реактора с негерметичными тепловыделяющими элементами (ТВЭлами). Для очистки натрия от цезия используют специальные ловушки с графитовым материалом. Графиты образуют с цезием устойчивые химические соединения — графитиды [1].

Использование таких ловушек позволит существенно улучшить радиационную обстановку, следовательно, снизить дозы облучения персонала, длительность и стоимость ремонта и демонтажа.

Реактор БН-350 с натриевым охлаждением эксплуатировался с 1972 г., обеспечивая население г. Актау (Казахстан) теплом и электричеством. Реактор был окончательно остановлен в 1999 г.

Согласно данным по изучению проб натрия, взятым в 2001 г., удельная активность радионуклидов ^{22}Na и ^{134}Cs в первом контуре реактора БН-350 составляла менее 3 % от радиоактивности ^{137}Cs . Это означало, что приблизительно 259 тыс. ГБк (7 тыс. Ки) радиоактивного ^{137}Cs в натрии первого контура являлось доминирующим радиоактивным источником, влияющим на последующую деятельность по выводу из эксплуатации. К тому времени концентрация ^{137}Cs в первом контуре составляла около 296 Бк/кг (8 нКи/кг). Такой уровень радиоактивности цезия значительно увеличивал степень риска и стоимость перевода реакторной установки в безопасное состояние (SAFSTOR). По этой причине было решено удалить максимально возможное количество цезия из теплоносителя перед его дренированием из первого контура.

Натриевый теплоноситель очищали от цезия и в период эксплуатации БН-350 на малогабаритных внутриреакторных адсорберах для выведения радионуклидов (МАВР), которые были спроектированы и изготовлены в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР). В качестве сорбента использовали обычный гранулированный малозольный графит типа ГМЗ-ОСЧ. Ловушки име-

ли форму обычной ТВС и устанавливались в ячейку активной зоны во время планово-предупредительных ремонтов. Натриевый теплоноситель прокачивался насосами первого контура при температуре натрия 260 °С. Первые две ловушки позволили снизить мощность дозы γ -излучения от трубопровода первого контура примерно в 4–5 раза. В результате четырех очисток из первого контура удалось вывести радионуклиды цезия Cs-134, Cs-137 суммарной активностью $\approx 5,8 \cdot 10^{14}$ Бк. Применение отдельно смонтированной системы очистки позволило более глубоко очистить натрий и поверхности оборудования.

Система очистки натрия от цезия разработана на основании конструкции, которая успешно использовалась в экспериментальном реакторе EBR-2 и работает на принципе преимущественной адсорбции цезия из натриево-цезиевого раствора углеродом. Семь ловушек, содержащих стеклоуглеродный сорбент, соединялись с первым контуром для очистки натрия. Каждая ловушка работала до полного насыщения сорбента цезием, после чего вырезалась и замещалась новой. Очищенный натрий возвращался в систему и продолжал циркулировать в петлях первого контура. Было удалено 255,3 тыс. ГБк (6,9 тыс. Ки) (более 98 %) цезия-137 из первого контура, что привело к снижению удельной активности цезия в 800 раз до концентрации 0,37 МБк/кг (10 мкКи/кг) [2]. На рис. 1 показано, как изменялась масса и доля удаленной активности каждой ловушки.

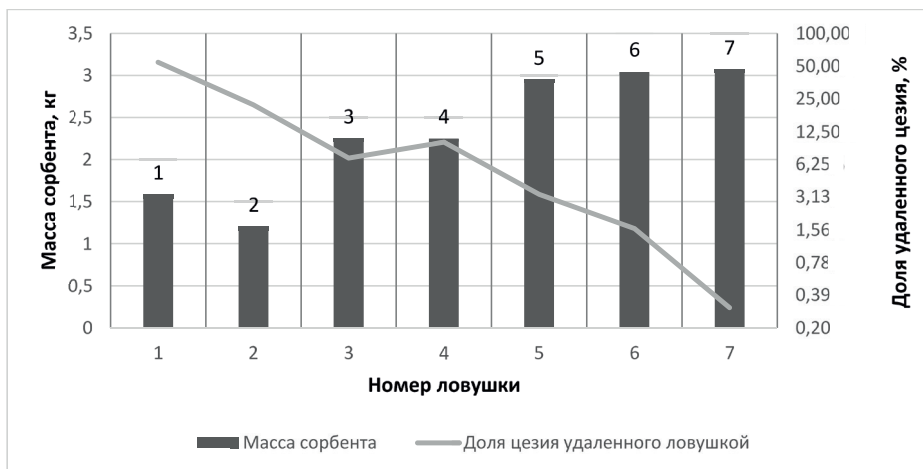


Рис. 1. Масса сорбента каждой ловушки и график изменения доли удаленной активности

На площадке Белоярской АЭС находится в эксплуатации энергоблок БН-600. В апреле 2010 г. было обосновано продление срока его эксплуатации и получена лицензия на эксплуатацию блока до 2025 г. В настоящее время ведутся подготовительные работы по обоснованию повторного продления срока эксплуатации блока до 2040 г. Поскольку останов и вывод из эксплуатации реакторной установки длительный и требует детальной подготовки и проработки проектных решений, целесообразно проанализировать разработанные для БН-350 технологии применительно к БН-600.

Для безопасного использования натрия первого контура БН-600 необходимо очистить от продуктов деления и других радионуклидов. Радиоактивность теплоносителя первого контура при работе реактора определяется ^{24}Na , после останова реактора и распада $^{24}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Na}$ и ^{137}Cs , небольшой вклад вносят ^{134}Cs и ^{54}Mn . Удельная активность ^{137}Cs составляет 36–45 МБк/кг без учета поверхностного загрязнения этим изотопом оборудования и трубопроводов, контактирующих с натрием первого контура. Для выхода ^{137}Cs их поверхностного слоя необходимо повысить температуру трубопроводов и оборудования, затем снизить температуру натрия. При этом ^{137}Cs выйдет из поверхностного слоя металла в натрий, что увеличит удельную активность натрия первого контура примерно в 1,5–2 раза.

Цезиевые ловушки, примененные на БН-350, — одна из технологий, которая возможна для очистки натрия БН-600. По предварительной оценке, для очистки всего объема натрия от ^{137}Cs может понадобиться до трех ловушек с 2,25 кг вспененного углерода [3].

Список источников

1. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : в 2 ч. / А. И. Бельтюков [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург : УрФУ, 2013. Ч. 1. 548 с.
2. Обращение с натриевым теплоносителем реактора на быстрых нейтронах / И. Таджибаева [и др.] Алматы : НТЦ БЯТ, 2010.
3. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН-350, -600 / Ю. В. Носов [и др.] // Атом. энергия. 2018. Т. 125, № 4. С. 195–199.

УДК 621.039

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ НАТРИЯ ЧЕРЕЗ НАСЫПНОЙ СЛОЙ ГРАФИТА

И. А. Бессонов¹, С. В. Чалпанов², О. Л. Ташлыков³, В. А. Климова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ilja.bessonov2014@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена постановка задачи моделирования течения натрия через насыпной слой графита ловушки для удаления радионуклидов цезия из теплоносителя реактора на быстрых нейтронах. Построена твердотельная модель ловушки. Произведен оценочный расчет движения жидкого натрия через ловушку.

Ключевые слова: натриевый теплоноситель, ловушка цезия, реактор на быстрых нейтронах, компьютерное моделирование, вычислительная гидродинамика

THE PROBLEM STATEMENT OF THE SIMULATION OF SODIUM FLOW THROUGH A GRAPHITE FILTER BED

I. A. Bessonov¹, S. V. Chalpanov², O. L. Tashlykov³, V. A. Klimova⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ilja.bessonov2014@yandex.ru

Реакторы на быстрых нейтронах имеют ряд преимуществ по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах, основным из которых является возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива. Ядерно-энергетические системы на основе быстрых реакторов являются одним из приоритетных направлений развития атомной

энергетики. В России технология быстрых реакторов с натриевым охлаждением является наиболее развитой: в настоящее время эксплуатируются два энергоблока Белоярской атомной электростанции (АЭС) с реакторами БН-600 и БН-800.

При расширении парка быстрых натриевых реакторов неизбежно возникнет проблема вывода таких энергоблоков из эксплуатации. В настоящее время окончательно остановлен энергоблок АЭС с реактором БН-350 (г. Актау, Казахстан).

Важной задачей при выводе АЭС с реакторами на быстрых нейтронах из эксплуатации является очистка натрия от изотопов цезия ^{134}Cs и ^{137}Cs , определяющих радиационную обстановку в первом контуре при работе реактора с негерметичными тепловыделяющими элементами (ТВЭлами). Эффективность улавливания цезия обычными холодными фильтр-ловушками мала. Для очистки натриевого теплоносителя от цезия используют специальные ловушки с графитовым материалом. Графиты образуют с цезием устойчивые химические соединения — графитиды, поэтому эффективно улавливают цезий из натриевого теплоносителя. Локализация цезия в ловушке приводит к его десорбции и снижению поверхностного загрязнения контура циркуляции [1; 2]. Использование таких ловушек позволит существенно улучшить радиационную обстановку, снизить дозы облучения персонала, длительность, стоимость ремонта и демонтажа.

На рис. 1, а показано устройство цезиевой ловушки. Поток натрия входит в ловушку через центральный входной трубопровод 8 под давлением 0,4 МПа. После смены направления потока и уменьшения его скорости натрий проходит через слой стеклоглеродного сорбента 5. Стеклоглеродный сорбент в виде набранного пакета цилиндрических дисков устанавливается внутри обечайки из нержавеющей стали 2 и удерживается на месте с помощью сеток в виде перфорированных пластин 3, установленных сверху и снизу сорбента. После прохождения через сорбент очищенный натрий проходит через сетчатый фильтр 4 из нержавеющей стали, предназначенный для задержки мелких частиц стеклоглерода, которые могут быть захвачены потоком натрия. После фильтра натрий выходит из ловушки и течет через экономайзер обратно в первый контур реактора. Каждая ловушка имеет электронагреватели для поддержания цезия в расплавленном состоянии в случае остановки и охлаждения системы. Снаружи нагреватели покрыты термоизоляцией и проволоочной сеткой, приваренной к корпусу

ловушки для удержания электропроводки внутри защитной оболочки ловушки.

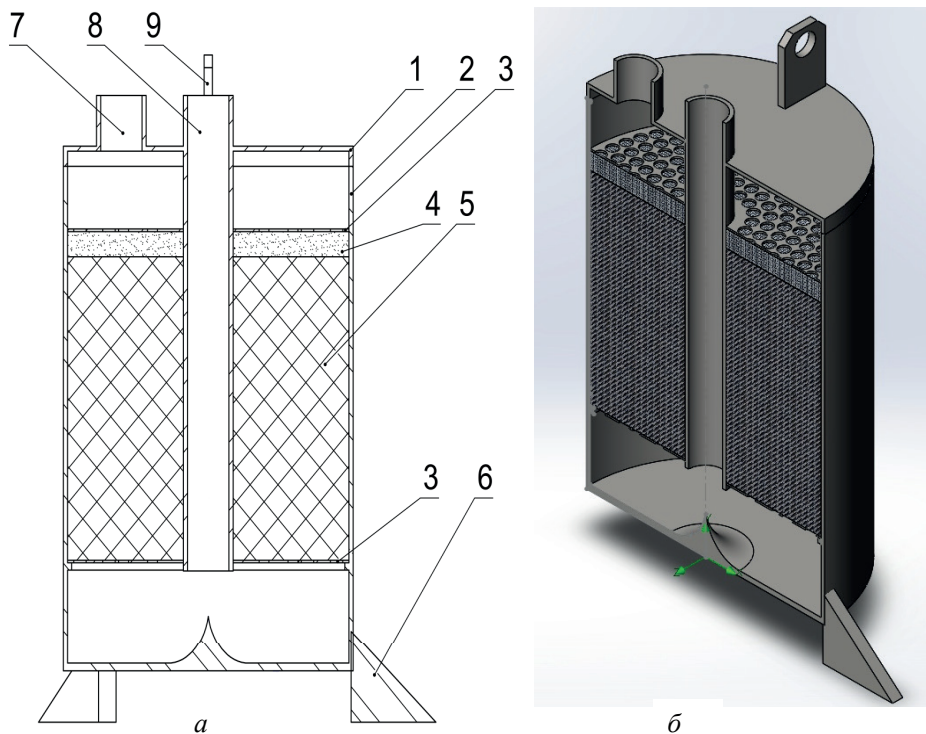


Рис. 1. Цезиевая ловушка (а) и ее модель (б):

- 1 — крышка; 2 — корпус; 3 — перфорированная пластина; 4 — фильтр;
5 — углерод; 6 — опорные ножки; 7 — выходной патрубок;
8 — входной патрубок; 9 — кронштейн — держатель кабелепровода

Целью настоящей работы является компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в цезиевой ловушке. Анализ результатов моделирования позволит выяснить, какие гидродинамические процессы влияют на эффективность ловушки, и оптимизировать ее конструкцию. Для решения поставленной задачи был выбран пакет моделирования SOLIDWORKS Flow Simulation, который позволяет моделировать движение и теплообмен потока жидкости в пористой среде [3]. Была создана твердотельная модель ловушки (рис. 1, б).

Проведено моделирование течения натрия в ловушке через пористую поверхность сорбента и через металлический фильтр. В первом

приближении в качестве пористого материала сорбента было выбрано пористое тело из инженерной базы данных Flow Simulation, обладающее похожими характеристиками. Также в расчете не рассматривался теплообмен натрия с окружающей средой.

В результате расчета были получены поля температур, давлений и скоростей в центральной плоскости ловушки и данные по сопротивлению течению. Моделирование показало принципиальную возможность использовать Flow Simulation для решения поставленной задачи, однако для верификации модели необходимы экспериментально определенные характеристики пористых материалов фильтров.

В перспективе планируется разработка нескольких вариантов ловушки. Предусматривается проверка их на способность проводить поток оптимальным образом, т. е. добиться максимального снижения потерь энергии потока при прохождении через ловушку.

Список источников

1. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : в 2 ч. / А. И. Бельтюков [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург : УрФУ, 2013. Ч. 1. 548 с.
2. Обращение с натриевым теплоносителем реактора на быстрых нейтронах / И. Таджибаева [и др.]. Алматы : НТЦ БЯТ, 2010.
3. Solidworks Flow Simulation, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 621.039

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА АЭС

А. В. Больших¹, В. В. Киргизов², А. И. Вальцева³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Alex-Liga@yandex.ru

Аннотация. Практически безынерционная информация о состоянии активной зоны водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), которую получают от аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП), делает эту аппаратуру основным средством для управления работой реактора, обеспечения его безопасной эксплуатации во всех режимах работы атомной электростанции (АЭС), в т. ч. при загрузке и перегрузке топлива, пуске из подкритического состояния, наборе мощности, работе в энергетическом режиме и останове.

Ключевые слова: атомная станция, нейтронный поток, каналы контроля

NUCLEAR POWER PLANT NEUTRON FLUX MONITORING SYSTEM

A. V. Bol'shikh¹, V. V. Kirgizov², A. I. Valtseva³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Alex-Liga@yandex.ru

Abstract. Virtually inertialess information about the state of the core of PWR-reactors, which is obtained from the neutron flux monitoring equipment, makes this equipment the main tool for controlling the work of the reactor, ensuring its safe operation in all operating modes of nuclear power plants, including: when loading and reloading fuel, starting from the subcritical state, power set, operation in power mode and shutdown.

Keywords: nuclear power plant, neutron flux, control channels

Аппаратура контроля нейтронного потока (АКНП) выполняет следующие функции: контроля мощности, периода и реактивности реактора по значению плотности нейтронного потока в каналах

ионизационных камер (ИК) и скорости ее изменения; формирования сигналов управления и защиты при превышении контролируемыми параметрами значений заданных пороговых уставок; представления информации на блочном пункте управления (БПУ) и резервном пункте управления (РПУ); архивирования значений контролируемых параметров; обмена информацией с другими подсистемами; формирования аналоговых сигналов для системы контроля вибрации системы контроля, управления и диагностики [1].

АКНП состоит из двух независимых четырехканальных комплектов формирования сигналов аварийной и предупредительной защиты (АЗ, ПЗ соответственно), устройств представления информации и аппаратуры контроля фиксации внутрикорпусных устройств.

Режим работы АКНП — непрерывный. АКНП обеспечивает контроль плотности потока нейтронов в каналах ИК, на основании которого производится расчет мощности.

Каналы контроля нейтронного потока (ККНП) обеспечивают на цифровых индикаторах БПУ и РПУ представление информации о мощности и периоде в цифровом виде в активном поддиапазоне контроля. АКНП контролирует значение мощности реактора с постоянной времени, которая не превышает определенного значения, которое зависит от диапазона уровня мощности [1].

АКНП обеспечивает: поканальное дистанционное задание оператором с БПУ уставок АЗ по мощности; автономное поканальное задание оператором с БПУ уставок АЗ по периоду.

Скорость изменения значений уставок — мгновенно (без учета транспортной задержки). АКНП предусматривает возможность оперативного изменения значений уставок непосредственно в устройствах накопления и обработки каналов АКНП.

Для обеспечения заданных значений погрешности вычисления мощности в АКНП предусмотрена автоматическая корректировка показаний мощности с учетом положения регулирующих групп, мощности реактора, значения температуры в холодных и горячих нитках циркуляционных петель с работающими главными циркуляционными насосными агрегатами. АКНП обеспечивает формирование дискретных сигналов превышения значений уставок по мощности и периоду, и выдачу их в шкафы устройства гальванической развязки сигналов оборудования (УГРС) и в автоматический регулятор мощности реактора. Каждый ККНП обеспечивает формирование и выдачу в шка-

фы УГРС аварийной и предупредительной защиты своего комплекта следующих дискретных сигналов: вывод в режим проверки или неисправность.

АКНП обеспечивает формирование аналоговых сигналов (4–20 мА), пропорциональных значению мощности, текущему значению периода, а также значению реактивности, на регистраторы БПУ [2]. Каждый канал ККНП обеспечивает прием четырех дискретных сигналов, характеризующих состояние главных циркуляционных насосных агрегатов четырех петель. АКНП обеспечивает автоматизированную проверку исправности каналов контроля в режиме периодической проверки на остановленном и работающем реакторе.

Конструкция АКНП обеспечивает взаимозаменяемость однотипных узлов и блоков из состава запасных частей и принадлежностей (ЗИП) без дополнительной настройки и регулировки, что гарантирует среднее время восстановления, не превышающее: по функциям АЗ — не более 1 ч; по функциям управления — не более 1 ч; по функциям информационным и вспомогательным — не более 2 ч.

АКНП состоит из двух независимых четырехканальных комплектов устройств представления информации [2].

В состав каждого комплекта входят: четыре канала контроля нейтронного потока; три устройства детектирования плотности потока нейтронов (УДПН) для работы в режимах загрузки/перегрузки ядерного топлива (вне реакторная СКП) и в поддиапазоне источника; три УДПН — для работы в режимах загрузки/перегрузки ядерного топлива с тремя блоками вспомогательными (внутриреакторная СКП); одно УДПН — для работы в режиме физического пуска реактора — АФП; шесть блоков индикации, четыре из которых размещается на БПУ, два — на РПУ; шлюзовое устройство АКНП.

В состав каждого канала входят: устройство накопления и обработки АКНП; два УДПН — для работы в пусковом и втором рабочем поддиапазоне; одно УДПН — для работы в первом рабочем поддиапазоне; два вспомогательных блока; блок задания уставок по мощности.

В состав АКНП входят пять типов устройств детектирования, каждое из которых состоит из блока детектирования и блока преобразования.

Взаимосвязь АКНП со смежными системами осуществляется при помощи стандартных унифицированных интерфейсов дискретными сигналами, аналоговыми сигналами, информационными пото-

ками. Каналы АКНП обеспечивают гальваническое разделение сигналов между блоками внутри самой АКНП. ТС АКНП имеют резерв по входным и выходным сигналам.

АКНП осуществляет обмен сигналами и информацией с аппаратурой системы управления и защиты реактора и смежных систем, входящих в АСУ ТП энергоблока.

Кроме этого, обеспечивается возможность выдачи в канал аналоговых сигналов тока или напряжения. Согласно классификации НП-001 (ОПБ 88/97) по влиянию на безопасность АКНП относится к элементам управляющей системы безопасности — класс 2 (2 НУ). В соответствии с НП-026-04 АКНП относится к функциональной группе 2УК2 [3].

Список источников

1. Аппаратура контроля нейтронного потока [Электронный ресурс] // СКУ-Атом: системы контроля и управления. URL: <http://sku-atom.ru/production/monitoring.html> (дата обращения: 04.11.2020).

2. Аппаратура контроля нейтронного потока (АКНП) [Электронный ресурс] // СистемАтом: Системы ядерной и радиационной безопасности. URL: <http://www.systematom.ru/hardware/aknp/> (дата обращения: 04.11.2020).

3. Аппаратура контроля нейтронного потока АКНП [Электронный ресурс] // ТЕККНОУ: мир точных измерений. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/59726-15-aknp-72029> (дата обращения: 04.11.2020).

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

А. А. Гаврилова¹, Р. В. Ключев²

^{1,2} Московский политехнический университет, Москва, Россия

² kluev-roman@rambler.ru

Аннотация. В работе приведены основные условия для разработки системы поддержания температуры воды в бассейне выдержки на примере Билибинской атомной электростанции.

Ключевые слова: атомная электростанция, бассейн выдержки, температура воды

DEVELOPMENT OF A WATER TEMPERATURE MAINTENANCE SYSTEM FOR RESIDENCE POOLS AT NUCLEAR POWER PLANTS

A. A. Gavrilova¹, R. V. Klyuev²

^{1,2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² kluev-roman@rambler.ru

Abstract. The paper presents the basic conditions for the development of a system for maintaining the water temperature in the spent fuel pool on the example of the Bilibino nuclear power plant.

Keywords: nuclear power plant, spent pool, water temperature

Объектом рассмотрения в работе является Билибинская атомная электростанция (БилАЭС), расположенная в Чукотской области неподалеку от г. Билибино. В состав БилАЭС входит четыре однотипных энергоблока и вспомогательные общестанционные сооружения и системы. В связи с необходимостью в обозримом будущем произвести останов работающих энергоблоков БилАЭС и подготовить станцию к выводу из эксплуатации нужно разработать ряд мероприятий. Одним из важных мероприятий является обеспечение тем-

пературы воды в период работы действующих бассейнов выдержки БилАЭС в допустимых пределах, исключая аварии с учетом особенностей климата и существующего состояния станционных систем.

Принципиальная схема действующей системы охлаждения приведена на рис. 1.

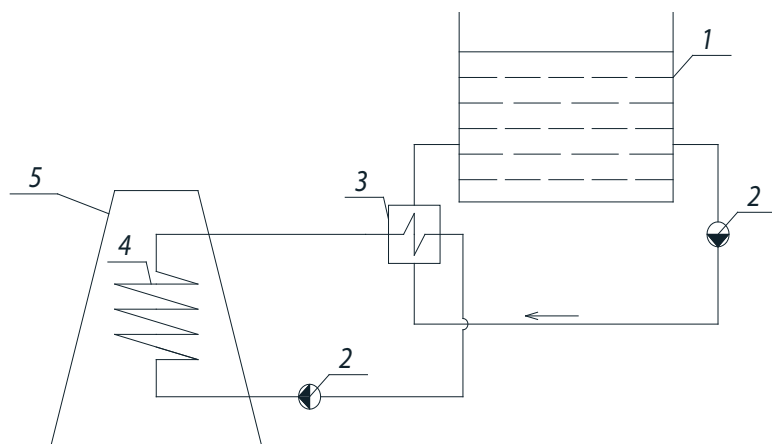


Рис. 1. Схема существующей системы охлаждения бассейна выдержки БилАЭС:

- 1 — бассейн выдержки; 2 — насосный агрегат циркуляции воды;
3 — аппарат теплообменный; 4 — поверхность теплообмена,
в состав градирни; 5 — градирня

В постэксплуатационный период после остановки энергоблоков БилАЭС предполагается останов и демонтаж многих существующих систем станции.

Одной из демонтируемых систем является демонтаж градирни и всех смежных с ней систем.

Основной причиной демонтажа градирни является ее ветхое состояние, не позволяющее ее использование в постэксплуатационный период.

Таким образом, учитывая перегрузку топлива из останавливаемых реакторных установок БилАЭС в бассейны выдержки и демонтаж источника охлаждения (градирни), появляется очевидная потребность в разработки иной, локальной системы поддержания температуры воды бассейнов выдержки.

Помимо вышеприведенного, стоит отметить еще один из немаловажных факторов — климатические параметры в месте расположения

БилАЭС: зону вечной мерзлоты. Экстремальная расчетная температура наружного воздуха составляет -60°C . Учитывая это, ветхость теплоизоляционных конструкций главного корпуса БилАЭС, условий постэксплуатационного периода: останов реакторных установок, приводящего к существенному падению тепловыделений в помещениях главного корпуса АЭС и демонтаж некоторых из систем существующих систем отопления и вентиляции, а также естественное падение со временем тепловыделений от топливных сборок, — появляется высокий риск падения температуры воды в бассейне до значений близких к 0°C .

Разрабатываемая система поддержания температуры воды в бассейне выдержки должна удовлетворять следующим условиям.

Исходя из условий постэксплуатационных режимов и объемов перегружаемого топлива, в работе будет находиться два бассейна выдержки БВ-3, БВ-4. Система поддержания температуры воды бассейнов выдержки единая для обоих бассейнов.

Учитывая трудности в очистке теплообменных аппаратов существующей системы охлаждения бассейнов выдержки (рис. 1, 3) в связи с радиоактивным излучением и во избежание возможного загрязнения поверхности теплообмена, предполагается использовать химически обессоленную воду (ХОВ) в замкнутом контуре.

Во избежание аварии теплообменных аппаратов (рис. 1, 3) предполагается ведение постоянного контроля активности ХОВ измерительными приборами. В случае выхода значения активности за допустимые пределы система поддержания температуры должна быть остановлена.

Из условий обеспечения надежности все ключевые элементы системы поддержания температуры должны иметь резервирование.

Исходя из условий обеспечения температуры воды бассейнов выдержки, во всех режимах работы вновь разрабатываемая система должна иметь возможность проведения ремонта ключевых элементов системы без ее остановки.

В силу того, что объем и существующих бассейнов выдержки БВ-3, и БВ-4 различны, тепловыделение от топливных элементов в разные постэксплуатационные периоды может быть различным, вновь разрабатываемая система должна иметь возможность осуществлять одновременную работу разных бассейнов в разных режимах, например обеспечение нагрева воды одного из бассейнов и охлаждение воды другого бассейна.

Разрабатываемая система должна быть оснащена достаточным количеством технологических органов контроля и управления и органов автоматики, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию.

Помимо материального барьера между контурами бассейнов выдержки и контура ХОВ, должен быть предусмотрен барьер давления.

Все вышеприведенные условия могут быть реализованы при условии обеспечения системы источником охлаждения и нагрева воды.

В качестве источника охлаждения предполагается использование существующей системы технической воды, которая будет охлаждать ХОВ замкнутого контура через теплообменный аппарат. В качестве источника нагрева предполагается использование электронагревательных установок [1; 2].

Список источников

1. Корниенко А. Г. Атомная энергетика России сегодня // Электр. станции. 2015. № 1 (1002). С. 47–59.
2. Рачкова Е. Н. Атомная энергетика и экологическая безопасность // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 4 (66). С. 67–69.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СЛОИСТОЙ ЗАЩИТЕ НА КРАТНОСТЬ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

С. М. Глухов¹, А. Д. Лёзов², В. Ю. Литовченко³, О. Л. Ташлыков⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ stepmihgl@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты расчета кратности ослабления гамма-излучения для различных расположений материалов в многослойной защите. Показано влияние на кратность ослабления порядка расположения слоев различных материалов. Определены наиболее эффективные комбинации материалов.

Ключевые слова: слоистая защита, гамма-излучение, кратность ослабления гамма-излучения

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ARRANGEMENT OF VARIOUS MATERIALS IN MULTILAYER PROTECTION ON THE MULTIPLICITY OF ATTENUATION OF GAMMA RADIATION

S. M. Glukhov¹, A. D. Lezov², V. Yu. Litovchenko³, O. L. Tashlykov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ stepmihgl@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of calculating the multiplicity of attenuation of gamma radiation for various arrangements of materials in multilayer protection. The influence on the attenuation factor of the order of the layers of different materials is shown. The most effective combinations of materials have been determined.

Keywords: multilayer protection, gamma radiation, attenuation factor gamma radiation

Оптимизация является одним из трех принципов радиационной безопасности. Принцип оптимизации требует, чтобы облучение человека всегда удерживалось на настолько низком уровне, насколько это разумно достижимо [1].

Основными способами защиты от внешнего облучения являются: защита временем; защита расстоянием; применение защитных экранов.

Экранирование является самым распространенным видом защиты. Использование защитных экранов позволяет человеку длительно работать вблизи источника радиации, оставаясь в безопасности. Используются поглотители необходимой толщины, которая зависит от изотопного состава радиоактивного загрязнения.

Целью работы является определение влияния на коэффициент ослабления различных расположений материалов в защите и выявление наиболее эффективной компоновки материалов для ослабления гамма-излучения определенного источника с помощью базы данных NIST XCOM [2]. Эта база данных позволяет определить массовый коэффициент ослабления излучения гамма-квантов для одного элемента, соединения или смеси элементов (рис. 1).

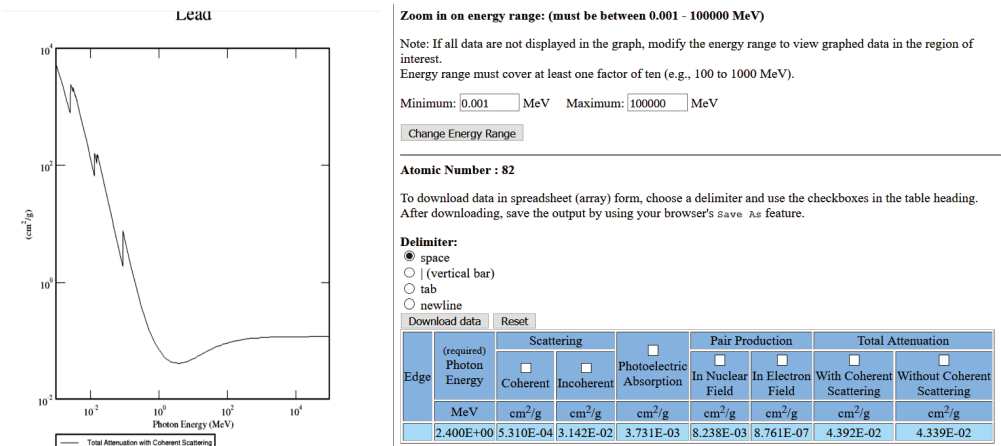


Рис. 1. Окно NIST XCOM при выводе результата для свинца

При расчете многослойной защиты были применены следующие упрощения: рассматривалось только гамма-излучение; защита состоит только из металлов и сплавов. Для оптимизации времени на исследо-

вания были предварительно проведены упрощенные расчеты, позволившие выявить три наиболее перспективные комбинации материалов. Для них были проведены уточненные расчеты.

Материалами, которые были выбраны по критериям доступности, коэффициенту ослабления гамма-излучения и другим параметрам, являются: белый чугун, свинец, висмут.

Поскольку энергия гамма-излучения изменяется при прохождении материалов в защите, используется формула для расчета изменения энергии после каждого слоя [3]:

$$\Delta E = I_0 St(1 - e^{-\mu_L x}).$$

Расчет интенсивности излучения и определение расположения слоев материалов, наиболее эффективных для ослабления гамма-излучения пучка узкой геометрии с учетом изменения энергии, проводился с помощью математического пакета Mathcad (рис. 2).

<p>После слоя белого чугуна</p> $x := 0.5 \cdot \text{cm}$ $I_0 := 0.559$ $\mu_1 := 5.856 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{gm}}$ $\rho_1 := 7.75 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$ $\mu_{\text{Fe3C}} := \mu_1 \cdot \rho_1 = 45.384 \frac{1}{\text{m}}$ $I := I_0 \cdot e^{-\mu_{\text{Fe3C}} \cdot x}$ $I = 0.446$ $E := I_0 \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{Fe3C}} \cdot x})$ $E = 0.113$	<p>$x := 0.5 \cdot \text{cm}$ После слоя Висмута</p> $\mu_3 := 6.909 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{gm}}$ $\rho_3 := 9790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $I_0 := 1$ $\mu_{\text{Bi}} := \mu_3 \cdot \rho_3 = 67.639 \frac{1}{\text{m}}$ $I := I_0 \cdot e^{-\mu_{\text{Bi}} \cdot x}$ $I = 0.713$ $E := I_0 \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{Bi}} \cdot x})$ $E = 0.16$
---	---

Рис. 2. Фрагмент вычислений в математическом пакете Mathcad

На рис. 3 представлены максимальные и минимальные значения кратностей ослабления комбинаций чередования для трех наборов материалов: три различных материала (свинец, висмут, белый чугун); два слоя свинца, один белого чугуна; два слоя висмута, один белого чугуна.

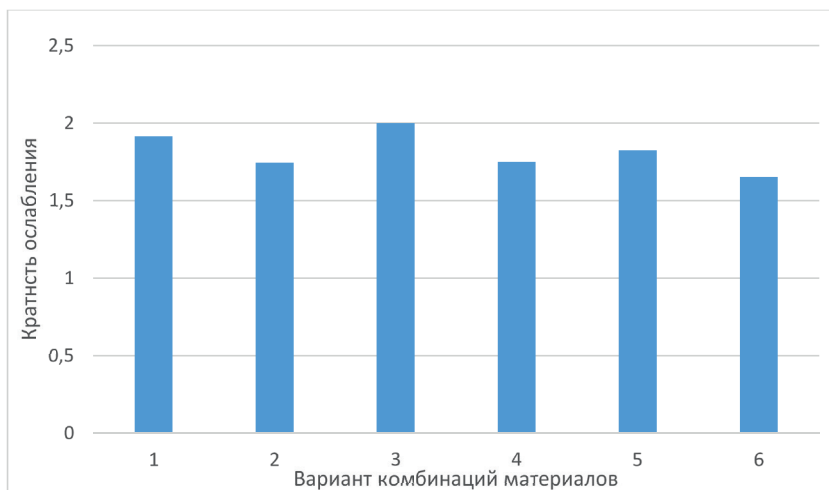


Рис. 3. Данные расчетов для некоторых компоновок:

1 — БЧ—Рb—Bi; 2 — Рb—БЧ—Bi; 3 — БЧ—Рb—Рb;
4 — Рb—Рb—БЧ; 5 — БЧ—Bi—Bi; 6 — Bi—Bi—БЧ

Различия кратности ослабления представленных компоновок: 1 и 2—9,8%; 2 и 3—14,3%; 5 и 6—10,4%.

Проведены расчеты для многослойной защиты от гамма-излучения с помощью программ Mathcad и с использованием базы данных Nist XCOM. При вычислениях различных чередований материалов было выявлено, что кратность ослабления гамма-излучения зависит от порядка расположения материала в слоистой защите.

Список источников

1. Михайлова А. Ф., Ташлыков О. Л. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала // Ядер. физика и инжиниринг. 2018. Т. 9, № 4. С. 393—401.

2. Element/Compound/Mixture Selection [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (дата обращения: 06.12.2020).

3. Расчет доз, создаваемых внешними источниками ионизирующих излучений [Электронный ресурс]. URL: http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/11_radioaktivnye_veshchestva_vrednye_veshchestva_gigienicheskie_normativy/5115 (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 621.039

СИСТЕМА ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Р. М. Исхужин¹, А. Д. Горбатов², А. И. Вальцева³

^{1,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

³ Alex-Liga@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается система внутриреакторного контроля Ленинградской атомной станции.

Ключевые слова: атомная станция, система автоматизации, реактор

LENINGRADSKAYA NUCLEAR POWER PLANT IN-REACTOR CONTROL SYSTEM

R. M. Iskhuzhin¹, A. A. Gorbatov², A. I. Valtseva³

^{1,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³ Alex-Liga@yandex.ru

Abstract. The article deals with the system of in-reactor control of the Leningradskaya nuclear power plant.

Keywords: nuclear power plant, automation system, reactor

С развитием науки и технологий на промышленных предприятиях все больше внедряются системы автоматизации. Они имеют большое количество преимуществ: позволяют с точностью отслеживать все процессы на производстве, уменьшают количество работников и позволяют избежать аварийных ситуаций. В энергетике, как и в других отраслях производства, автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) приобретают все большее рас-

пространение, начиная от малых котельных и заканчивая большими электрическими станциями.

Технология использования энергии атома является одной из самых сложных и относительно молодых в получении электроэнергии. В связи с этим становление и развитие систем внутриреакторного контроля неразрывно связано с ростом требований надежного контроля распределения энерговыделения в активной зоне [1]. Впервые системы внутриреакторного контроля были введены на Ленинградской атомной электростанции (АЭС) с учетом использования опыта эксплуатации станции [2; 3].

Система внутриреакторного контроля (СВРК) является основным элементом контроля ядерного топлива, а также параметров, связанных с безопасностью эксплуатации реакторной установки. Важной особенностью СВРК является необходимость контроля полей энерговыделения, температурных полей, контроля нахождения основных технологических параметров в пределах заданных установок и эксплуатационных ограничений при различных режимах работы РУ, в т. ч. в случае отказа основного технологического оборудования и других нестандартных ситуаций.

СВРК является комплексной автоматизированной системой, входящей в систему контроля, управления и диагностики (СКУД), и представляет собой автономную, функционально законченную систему, связанную информационными потоками с подсистемами СКУД и внешними системами энергоблока.

В состав СВРК входят: первичные преобразователи внутриреакторного контроля нейтронного потока; первичные преобразователи контроля температуры теплоносителя на выходе тепловыделяющей сборки (ТВС) и под крышкой реактора, первичные преобразователи контроля температуры теплоносителя в главном циркуляционном трубопроводе (ГЦТ); линии связи и вспомогательные устройства, включая: программно-технический комплекс (ПТК); клеммные шкафы.

СВРК относится к восстанавливаемым, обслуживаемым системам длительного пользования (кроме внутриреакторных датчиков и кабельных трасс в гермозоне). Основные программно-технические средства СВРК имеют дублированную структуру, позволяющую сохранить выполнение системой своих функций при единичных отказах на время их устранения. Это позволяет СВРК функционировать непрерывно. Схема управления СВРК представлена на рис. 1.

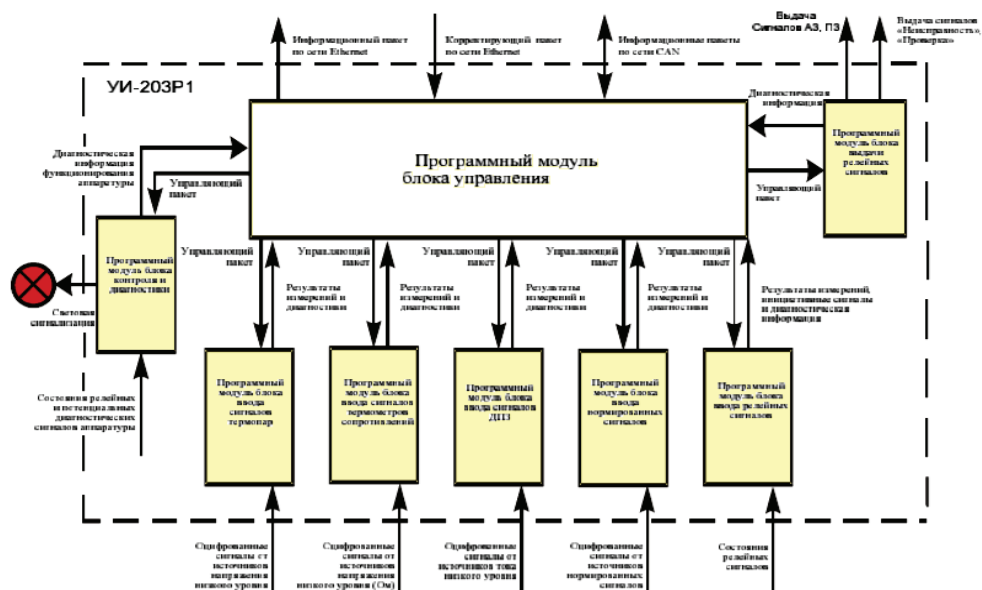


Рис. 1. Схема управления СВРК

Программное обеспечение СВРК состоит из системного программного обеспечения и прикладного программного обеспечения. Системное программное обеспечение обеспечивает защиту программного обеспечения и данных от несанкционированного доступа.

Прикладное программное обеспечение строится по модульному принципу и представляет собой набор модулей, выполняющих функции, возложенные на конкретные функциональные группы программно-технического комплекса. В ПТК реализованы следующие функции:

- 1) первичная обработка аналоговых сигналов;
- 2) перевод нормированных сигналов в физические величины;
- 3) прием дискретных сигналов;
- 4) устранение запаздывания детекторов прямого заряда (ДПЗ);
- 5) расчет массовых расходов теплоносителя в петлях первого контура;
- 6) определение значений температур по сигналам термометров сопротивления;
- 7) расчет тепловой мощности реактора по теплогидравлическим характеристикам первого контура;
- 8) расчет тепловой мощности реактора по сигналам ДПЗ;

9) определение максимального линейного значения энерговыделения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и формирование сигналов предупредительной защиты по определенному параметру;

10) определение минимального значения запаса до кризиса теплообмена и формирование сигналов предупредительной защиты;

11) передача информации в ВК СВРК и СК-НУ.

Логика работы ПТК представлена на рис. 2.

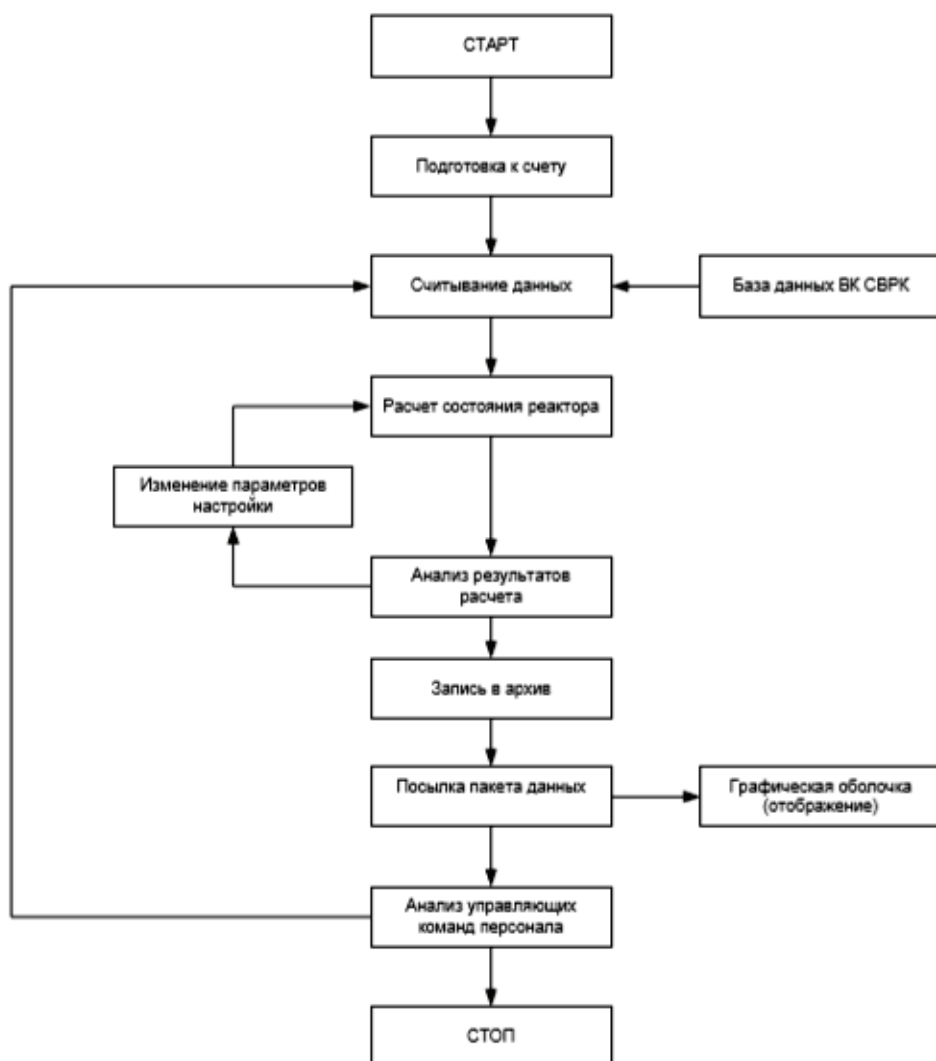


Рис. 2. Логика работы модуля

Каждый блок управления в программе, записанной в памяти блока, через свободную магистраль осуществляет циклический обмен информацией с блоками ввода/вывода, проводит предварительную обработку полученной информации, выполняет заданные алгоритмами расчеты и осуществляет обмен с внешней средой по Ethernet и CAN. Обмен информацией между программными модулями осуществляется через обменную память, расположенную в блоках ввода/вывода.

Программные модули работают независимо друг от друга и не оказывают влияние на работоспособность других модулей. Сама система СВРК отвечает всем правилам ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.

Список источников

1. Маргулова Т. Х., Подушко Л. А. Атомные электрические станции. М. : Энергоиздат, 1982. 263 с.
2. Ленинградская АЭС [Электронный ресурс] // Росэнергоатом. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-leningradskoy-aes/ (дата обращения: 10.12.2020).
3. Калинушкин А. Е., Семченков Ю. М. Современная система контроля, управления и диагностики реакторов ВВЭР большой мощности [Электронный ресурс] // Доклады БГУИР. 2015. № 2 (88). С. 81–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-sistema-kontrolya-upravleniya-i-dagnostiki-reaktorov-vver-bolshoy-moschnosti/> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 66.011

ОКИСЛЕНИЕ КАТИОНИТА КУ-2×8 РАСТВОРОМ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА

М. М. Козлова¹, В. Ф. Марков², Л. Н. Маскаева³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ marina.kozlova2014@mail.ru

Аннотация. В работе исследована кинетика безкаталитического и каталитического окислительного разложения катионита КУ-2×8 с использованием пероксида водорода. Оценено влияние на процесс таких факторов, как температура процесса и концентрация пероксида водорода. Рассчитаны значения энергии активации безкаталитического и каталитического разложения катионита пероксидом водорода. Исследовано изменение морфологии поверхности окисленного катионита.

Ключевые слова: катионит КУ-2×8, пероксид водорода, процесс Фентона, константа скорости процесса, энергия активации

THE OXIDATION OF CATION EXCHANGE RESIN KU-2×8 WITH A SOLUTION OF HYDROGEN PEROXIDE

M. M. Kozlova¹, V. F. Markov², L. N. Maskaeva³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ marina.kozlova2014@mail.ru

Abstract. In work the kinetics of noncatalytic and catalytic oxidative decomposition of the cation exchanger KU-2×8 using hydrogen peroxide was studied. The influence on the process of such factors as the process temperature and the concentration of hydrogen peroxide was estimated. The values of the activation energy of the noncatalytic and catalytic decomposition of the cation exchanger by hydrogen peroxide have been calculated. The change in the surface morphology of the oxidized cation exchanger has been studied.

Keywords: cation exchange resin KU-2×8, hydrogen peroxide, Fenton process, process rate constant, activation energy.

Ионообменные смолы применяют в процессах водоподготовки и очистки сточных вод на предприятиях атомной энергетики. Одной из распространенных отечественных смол, используемых на атомных электростанциях (АЭС), является катионит КУ-2×8. В результате очистки сточных вод на АЭС образуются малоактивные отработанные ионообменные смолы. Такие смолы необходимо перерабатывать для снижения негативного воздействия на окружающую среду. Применение традиционных технологий для утилизации отработанных ионообменных смол является экономически нецелесообразным. К перспективному способу утилизации отработанных смол можно отнести процесс Фентона, который заключается в окислительной деструкции органических соединений при действии на них пероксида водорода. В качестве каталитической добавки используют соли двухвалентных переходных металлов, в частности соли меди (II).

В работе проведены кинетические исследования безкаталитического и каталитического окислительного разложения катионита КУ-2×8 водным раствором пероксида водорода.

При безкаталитическом окислении катионита 5–25 % раствором пероксида водорода установлено, что существенное влияние на увеличение скорости разложения оказывает повышение температуры процесса от 348 до 368 К (рис. 1, а). Изменение концентрации H_2O_2 не влияет значительно на скорость окислительного разложения катионита.

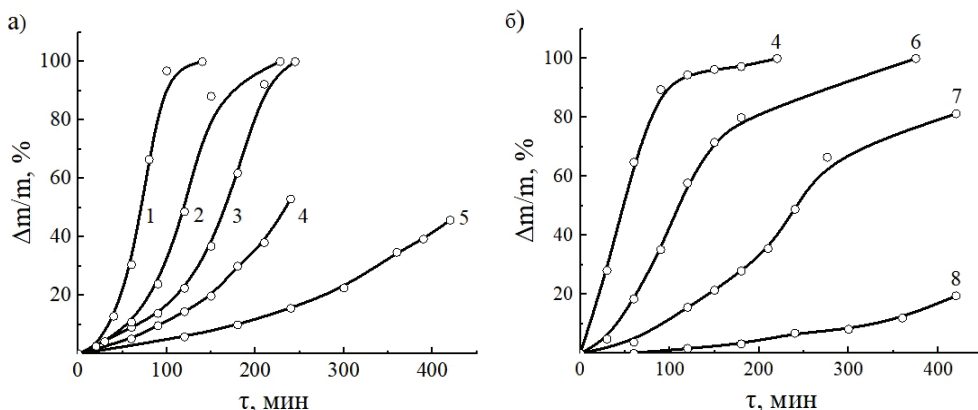


Рис. 1. Кинетические кривые относительной потери массы катионита КУ-2×8 в 20 % H_2O_2 (а) и с добавлением 0,005 ммоль/л $CuSO_4$ (б) при температуре, К: 368 (1), 363 (2), 358 (3), 353 (4), 348 (5), 343 (6), 333 (7), 323 (8)

При окислении катионита 20 % пероксидом водорода с добавлением 0,001–0,009 ммоль/л катализатора сульфата меди (II) наблюдается ускорение процесса при относительно низких температурах (рис. 1, б).

Вычислены значения энергии активации реакции безкаталитического окисления катионита пероксидом водорода, находящиеся в пределах 132,46–141,96 кДж/моль. При добавлении катализатора CuSO_4 значения энергии активации снижаются и составляют 89,7–115,2 кДж/моль. Полученные значения энергии активации во всех случаях характерны для процессов, протекающих в кинетической области.

Проведено исследование морфологии поверхности гранул катионита в процессе безкаталитического и каталитического окисления пероксидом водорода. На рис. 2, а видно, что поверхность катионита до окисления относительно гладкая. На поверхности смолы наблюдаются преимущественно локальные изменения (рис. 2, б, в). При этом гранула катионита изменила свою форму, объем, а ее поверхность покрылась трещинами, вследствие разрушения поперечных связей катионита в процессе окислительного разложения, что приводит к снижению его механической прочности.

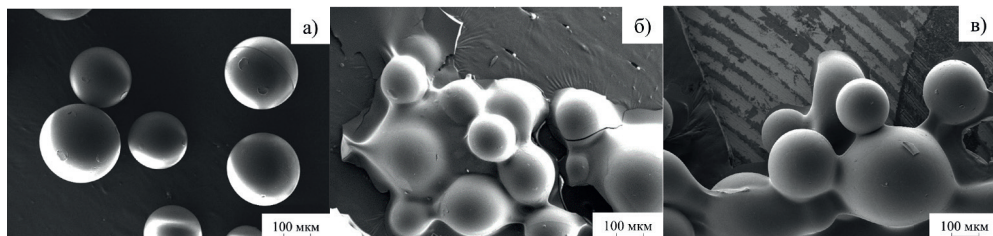


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения поверхности катионита КУ-2×8 до окисления (а), после воздействия 20 % пероксидом водорода (б) и с добавлением CuSO_4 (в)

Таким образом, окислительное разложение на основе процесса Фентона может быть перспективной и экономически эффективной технологией для утилизации отработанных ионообменных смол атомных электростанций.

УДК 621.039

ПОЛУЧЕНИЕ СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА АЭС ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИИ И НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

**В. С. Костарев¹, И. А. Ширманов², Д. Н. Литвинов³,
А. А. Аникин⁴, С. Е. Щеклеин⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ slavalkostarev@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты компьютерного моделирования вариантов тепловых схем атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР-1200, БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием огневого перегрева пара, а также паровой компрессии для получения суперсверхкритических параметров пара, проведена оценка эффективности использования таких тепловых схем.

Ключевые слова: тепловая схема АЭС, термодинамическая эффективность, суперсверхкритические параметры пара, ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300.

ON THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF COMPRESSION AND NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING FOR OBTAINING ULTRA-SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS AT NPPS

**V. S. Kostarev¹, I. A. Shirmanov², D. N. Litvinov³,
A. A. Anikin⁴, S. E. Shcheklein⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ slavalkostarev@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of computer simulation of options for thermal schemes of NPPs with WWER-1200, BN-1200 and BREST-OD-300 re-

actors using fire superheating of steam, as well as steam compression to achieve super-supercritical steam parameters, and an assessment of the efficiency of using thermal parameters.

Keywords: thermal circuit of nuclear power plants, thermodynamic efficiency, ultra-supercritical steam parameters, WWER-1200, BN-1200, BREST-OD-300

В настоящее время мировая теплоэнергетика уже начала переход на суперсверхкритические параметры пара, что позволяет увеличить коэффициент полезного действия (КПД) и снизить расход топлива, и, соответственно, сбросы вредных веществ в окружающую среду. В настоящее время атомные и тепловые электрические станции составляют большую часть энергетической системы России — 81,7 % по состоянию на 2019 г. [1].

Для повышения энергоэффективности атомных электростанций (АЭС) рассматриваются многочисленные инновационные проекты, такие как реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, проектируемый БН-1200), а также реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, сооружаемый в настоящее время в г. Северске на площадке Сибирского химического комбината. Такие реакторы являются инновационными проектами, способными положительно повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики.

В настоящей работе представлены результаты моделирования различных вариантов тепловых схем реакторов ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300 (стандартный цикл; стандартный цикл с начальным огневим перегревом пара; цикл с компрессией и одноступенчатым промежуточным огневим перегревом пара; цикл с компрессией и двухступенчатым промежуточным огневим перегревом пара; цикл с компрессией, начальным и одноступенчатым промежуточным огневим перегревом пара; цикл с компрессией, начальным и двухступенчатым промежуточным огневим перегревом пара) при помощи системы автоматизированного проектирования (САПР) United Cycle. Целью работы является определение наиболее эффективного варианта модификации тепловой схемы АЭС с БН-1200 (применение компрессии и неядерного огневого перегрева пара для поручения суперсверхкритических параметров пара) с термодинамической точки зрения.

Современный уровень развития энергетического машиностроения, благодаря которому стало возможно создание высокотемпературных

паровых турбин, рассчитанных на суперсверхкритические параметры пара ($P = 30$ МПа, $t = 650$ °С), и паровых компрессоров, сделал возможным широкое применение в теплоэнергетике циклов на подобных параметрах пара [2–4].

Для решения задач моделирования тепловых схем АЭС использовался программный пакет САПР United Cycle, предназначенный для решения задач и определения наилучшей структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы [5; 6].

В САПР United Cycle были построены несколько потенциально возможных вариантов тепловых схем для их дальнейшего расчета. Рассматривались следующие варианты:

- 1) тепловая схема реакторной установки со стандартными параметрами;
- 2) тепловая схема РУ со стандартными параметрами и начальным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- 3) схема с компрессией (до 30 МПа) и одним промежуточным перегревом пара (до 650 °С);
- 4) схема с компрессией (до 30 МПа), начальным и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Для реактора ВВЭР-1200 по причине понижения начальных параметров были также рассчитаны два дополнительных варианта:

- 1) схема с компрессией (до 30 МПа), начальным и одним промежуточным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- 2) схема с компрессией (до 30 МПа) и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Результаты показали, что при понижении начальных параметров термодинамического цикла ВВЭР-1200 до $t = 250$ °С, $P = 3,98$ МПа с последующим сжатием до 30 МПа и огневым перегревом до 650 °С электрическая мощность увеличится на 50 %, КПД нетто увеличится на 20 %, а глубина выгорания топлива увеличится на 3 % по сравнению со стандартным циклом установки, что позволит повысить термодинамическую эффективность цикла и увеличить продолжительность топливной кампании.

Понижение начальных параметров пара на легководных АЭС является оправданным мероприятием, поскольку позволяет уменьшить давление в корпусе реактора и повысить глубину выгорания топлива.

При применении в тепловой схеме реактора БН-1200 компрессии пара и его последующего промежуточного неядерного (огневого) перегрева после цилиндра высокого давления (ЦВД) электрическая мощность установки увеличится на 50 %, а КПД нетто увеличится на 5 % по сравнению со стандартным циклом установки, что также приводит к значительному повышению термодинамической эффективности цикла.

Аналогично при применении в тепловой схеме реактора БРЕСТ-ОД-300 компрессии и огневого перегрева пара электрическая мощность установки увеличится на 24,84 %, а КПД нетто увеличится 3,82 % по сравнению со стандартным циклом установки.

Таким образом, применение компрессии и неядерного (огневого) перегрева пара для получения суперсверхкритических параметров на АЭС с рассматриваемыми типами реакторов позволяет значительно повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, а также коэффициент полезного действия. Дальнейшее совершенствование термодинамического цикла легководных АЭС является весьма эффективным с термодинамической точки зрения.

Список источников

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы. 2019. 18 с. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf (дата обращения: 06.12.2020).
2. Касилов В. Ф., Низовой А. В. Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций // Науч. исслед.: от теории к практике. 2015. № 4 (5). С. 34–38.
3. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водоводяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 12. С. 21–29.
4. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : в 2 ч. / А. И. Бельтюков [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург : УрФУ, 2013. Ч. 1. 548 с.
5. САПР United Cycle [Электронный ресурс]. URL: <https://msystema.ru/o-produkte> (дата обращения: 06.12.2020).
6. Студенческая версия САПР United Cycle [Электронный ресурс]. URL: <https://msystema.ru/studentam> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 621.039

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ТИПА ВВЭР ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

В. С. Костарев¹, И. А. Ширманов², Д. Н. Литвинов³, С. Е. Щеклеин⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ slavakostarev@yandex.ru

Аннотация. В работе представлено обоснование эффективности применения огневого перегрева пара в термодинамическом цикле АЭС с реактором ВВЭР-1200 для повышения эффективности использования ядерного топлива, а также безопасности реакторной установки в целом.

Ключевые слова: тепловая схема АЭС, повышение безопасности АЭС, ВВЭР-1200, глубина выгорания ядерного топлива

ON THE POSSIBILITY OF EFFICIENCY INCREASING OF THE NUCLEAR FUEL USAGE AND NPP SAFETY AT NPPS WITH WWER REACTOR BY USING NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING

V. S. Kostarev¹, I. A. Shirmanov², D. N. Litvinov³, S. E. Shcheklein⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ slavakostarev@yandex.ru

Abstract. The paper presents the substantiation of the effectiveness of using fire steam superheating in the thermodynamic circuit of a nuclear power plant with a WWER-1200 reactor to increase the efficiency of using nuclear fuel, as well as the safety of the reactor plant.

Keywords: NPP thermal circuit, NPP safety improvement, WWER-1200, nuclear fuel burnup

В настоящее время самым распространенным в атомной энергетике типом реактора является реактор с водой под давлением (ВВЭР, или PWR).

Существенным недостатком таких реакторов является низкое значение начальных параметров пара (температура и давление). Это объясняется ограничением по температуре, равным 350 °С для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) из циркониевых сплавов. По этой причине температура пара во втором контуре не может превышать 315 °С. Коэффициент полезного действия (КПД) современных атомных электростанций (АЭС) с водо-водяными реакторами находится на уровне 35 %, что ниже КПД современных тепловых электростанций (ТЭС) (45 %) и значительно ниже КПД парогазовых электростанций (60 %) [1].

В работе рассматривается возможность повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности реакторов типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) путем применения начально-го огневого перегрева пара в термодинамическом цикле АЭС [2; 3].

Для достижения цели авторами моделировалась тепловая схема АЭС с реактором типа ВВЭР с применением в термодинамическом цикле начального огневого перегрева пара, произведен анализ такой тепловой схемы на предмет целесообразности потенциального применения.

Для решения задачи повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности авторами было принято решение понизить параметры первого и второго контура такой ядерной энергетической установки, исходя из термодинамических соображений. Таким образом, после понижения начальные параметры второго контура АЭС приняли следующие значения: $P = 3,98$ МПа, $T = 250$ °С, а параметры первого контура — следующие: $P = 8,0$ МПа, $T = 275$ °С.

Для компенсации снижения электрической мощности и КПД после понижения начальных параметров в тепловую схему после парогенератора был добавлен газовый котел. Таким образом, в предлагаемой авторами модификации тепловой схемы АЭС с реактором типа ВВЭР пар после парогенератора с пониженными параметрами попадает в огневой котел на начальный перегрев, где перегревается до температуры 650 °С, после чего подается на турбину. В связи с высокой температурой пара после котла становится возможным отказаться от системы промежуточного перегрева (после ЦВД пар обладает достаточно высокой температурой для подачи сразу в цилиндр низкого

давления (ЦНД)). Такой вариант тепловой схемы был смоделирован и рассчитан при помощи системы автоматизированного проектирования United Cycle.

По результатам моделирования и расчета в системе автоматизированного проектирования (САПР) United Cycle были определены КПД нетто и электрическая мощность предлагаемой авторами тепловой схемы. Численные значения параметров равны: $N_3 = 2048$ МВт, $\eta_{\text{нетто}} = 37,21\%$, что выше, чем у стандартной тепловой схемы ВВЭР-1200. Требуемый расход газообразного топлива в котле при этом составит $51,10 \text{ м}^3$.

Относительный прирост глубины выгорания у такой схемы в сравнении со стандартной составляет $2,9\%$. Это означает, что понижение начальных параметров термодинамического цикла АЭС позволяет увеличить глубину выгорания ядерного топлива в реакторе, и, как следствие, продолжительность топливной кампании.

Применение огневого перегрева пара позволяет привести не только к повышению коэффициента полезного действия и снижению глубины выгорания ядерного топлива, но и к общему изменению других показателей.

В связи с уменьшением давления первого контура до 8 МПа (16 МПа без использования огневого перегрева пара) появляется возможность для существенного снижения толщины корпуса реактора [4], что в дальнейшем способствует удешевлению его производства, а также увеличивает пространство, которое способна занять биологическая защита. Также это позволяет снизить общую металлоемкость блока с реактором ВВЭР-1200, т. к. со снижением давления снижается не только толщина корпуса, но и толщина стенок арматуры и трубопроводов, связанных с первым контуром реактора.

Согласно расчетам, понижение параметров первого контура на 32% , снижает расход текучей среды во время разрыва трубопровода первого контура, что снижает риск травм, жертв среди обслуживающего персонала, время на восстановление участка трубопровода при аварии такого типа установки [5].

Также понижение начальных параметров вкупе с применением огневого перегрева пара приводит к уменьшению удельного расхода охлаждающей воды. Удельный расход охлаждающей воды в модифицированной схеме на 2050 МВт составит $116,5 \text{ т/ч}$. В сравнении с проектной тепловой схемой удельный расход охлаждающей воды на 1 МВт снижен на $21,6\%$.

Таким образом, понижение начальных параметров первого и второго контуров АЭС с реактором типа ВВЭР с последующим применением неядерного (огневого) перегрева пара позволяет повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС и коэффициент полезного действия. Также при этом наблюдается повышение глубины выгорания ядерного топлива, снижение расхода текучей среды при разрыве трубопровода первого контура и уменьшение удельного расхода охлаждающей воды в конденсаторе. Можно сделать вывод, что применение понижения начальных параметров вкпе с последующим огневм перегревом пара на АЭС типа ВВЭР является оправданным мероприятием для повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности АЭС в целом.

Список источников

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы. 2019. 18 с. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf (дата обращения: 06.12.2020).
2. Касилов В. Ф., Низовой А. В. Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций // Науч. исслед.: от теории к практике. 2015. № 4 (5). С. 34–38.
3. Щеклеин С. Е., Титов Г. П., Борисова Е. В. Влияние температурных характеристик на глубину выгорания ядерного топлива // Вестник Одес. политехн. ун-та. 2011. № 2 (36). С. 104–108.
4. Захарова Л. П., Киреев Н. В. Современные подходы к обоснованию прочности корпуса реактора СМ // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. 2017. № 1. С. 21–27.
5. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности [Электронный ресурс] : руководство по безопасности : утверждено приказом Федер. службы по экол., технол. и атом. надзору от 29.06.2016 № 272. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136968?marker=7D20K3> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 621.039: 330.34

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КИТАЯ

Е. А. Маралова¹, С. Е. Щеклеин²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ maral421@mail.ru

Аннотация. В работе представлено текущее состояние атомной энергетики Китая, а также рассмотрены перспективные пути развития атомной промышленности этой страны.

Ключевые слова: Китай, атомная энергетика, HPR-1000, CAP-1400

THE CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CHINA'S NUCLEAR ENERGY

E. A. Maralova¹, S. E. Shcheklein²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ maral421@mail.ru

Abstract. The work presents the current state of the nuclear power industry in China. Perspective ways of development of the nuclear industry in China are considered.

Keywords: China, nuclear power, HPR-1000, CAP-1400

Ядерная энергетика Китая (за исключением Тайваня) насчитывает 50 действующих промышленных ядерных реакторов, расположенных на 17 атомных электростанциях, общей мощностью 47,5 ГВт. В стадии строительства находится 11 блоков, планируется около 30. На 2019 г. доля атомной энергетики в общем производстве электроэнергии составляет лишь 4,9 %. Для Китая как для самой динамично развивающейся страны такая доля атомной энергетики в общем производстве энергоресурсов очень мала [1].

Китай развил свою ядерную промышленность сравнительно недавно, что стало причиной нежелания западных стран вкладывать средства в ядерные технологии этой страны. Китайское правительство вкладывает значительные средства в развитие ядерной энергетики своей страны, чтобы производить электроэнергию экологически более чистым способом.

В настоящее время в Китае эксплуатируются в основном водо-водяные реакторы, но также имеются тяжеловодные ядерные реакторы и один исследовательский реактор-размножитель на быстрых нейтронах (рис. 1).

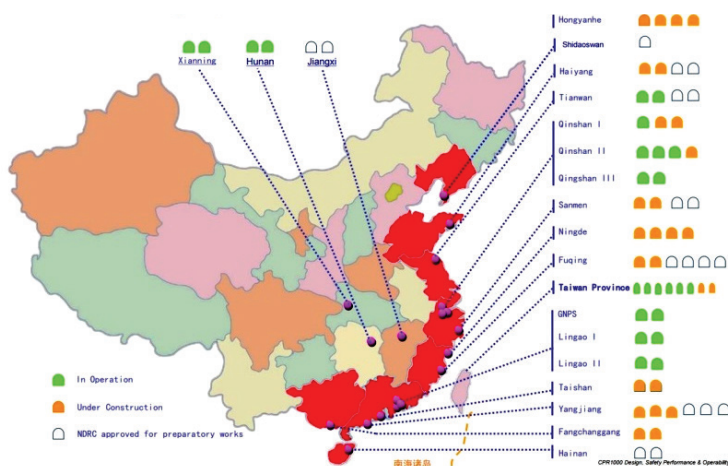


Рис. 1. Географическое расположение атомных станций в Китае

Наиболее используемый тип реактора — CPR-1000; это водо-водяной реактор под давлением, представляющий собой китайский вариант французского проекта M310. В Китае реакторы типа CPR-1000 относятся к поколению 2,5.

В планах китайских властей добиться использования 110 ядерных реакторов к 2030 г. и статуса одного из крупнейших потребителей атомной энергии в мире. Четырнадцатая пятилетка (2021–2025 гг.) предусматривает строительство примерно 6–8 ядерных реакторов в год. При этом планируется использовать технологии, разработанные внутри страны [2].

В настоящее время самыми перспективными реакторами, разрабатываемыми в Китае, являются Hualong One (или HPR-1000) и CAP-1400.

Hualong One (рис. 2) — трехконтурный водо-водяной реактор с водой под давлением, разработанный China General Nuclear Power Group (CGNPG) и China National Nuclear Corporation на основе реакторов ACPR-1000 и ACP-1000. Предполагается, что реакторы такого типа

будут служить около 60 лет, при этом выходная мощность их составит до 1100 МВт. В этом реакторе используется комбинация пассивных (зеленая линия) и активных (красная линия) систем безопасности с двойной защитой [3].

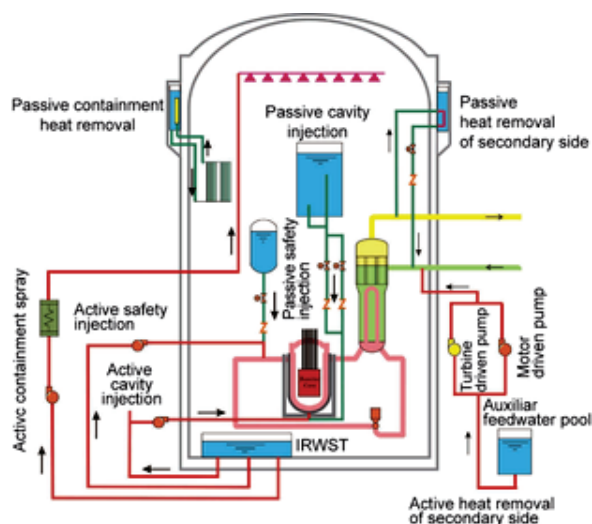


Рис. 2. Строение реактора HPR-1000

САР-1400 (рис. 3) — двухпетлевой реактор третьего поколения, который представляет собой усовершенствованную версию американского реактора AP-1000. Проектный срок службы реактора САР-1400—60 лет.

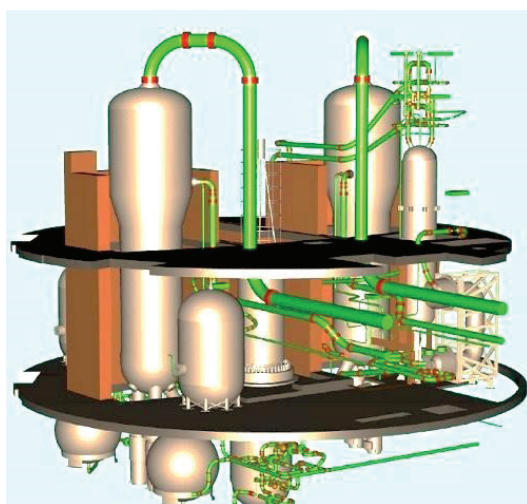


Рис. 3. Модель ядерного реактора САР-1400

В таком реакторе используются пассивные системы безопасности, отсутствует ловушка расплава, имеются дожигатели водорода, а также основной упор сделан на удержание топлива в корпусе реактора.

Главным достоинством этого типа реакторной установки является ее относительная дешевизна. Экспортировать реакторы CAP-1400 Китай начал еще до того, как построил хотя бы одну установку такого типа в своей стране [4].

Информация о строящихся в Китае и за рубежом реакторах Hualong One и CAP-1000 представлена в таблице.

Таблица

Строительство китайских реакторов нового типа в мире

Страна	Станция	Энергоблок, №	Начало строительства
Реакторы типа Hualong One			
Китай	Фуцин	5, 6	2015
	Фанчэнган	3, 4	2015, 2016
	Тайпинглинг	1	2019
	Чжэнчжоу	2, 3	2019, 2020
Пакистан	Карачи	2, 3	2015, 2016
Реакторы типа CAP-1400			
Китай	Шидаовань	2	2019

В целом темпы развития атомной промышленности в Китае можно назвать «ударными». По планам на 2030 г. страна должна будет прийти к суммарной мощности своих АЭС порядка 240 ГВт [5]. В связи с этим Китай делает упор на разработку собственных ядерных технологий, в частности создание новых недорогих реакторных установок, которые в перспективе смогут выгодно экспортироваться в другие страны.

Список источников

1. The Database on Nuclear Power Reactors [Electronic resource] // International Atomic Energy Agency (IAEA). URL: <https://pris.iaea.org/signin> (date of access: 20.11.2020).

2. Китай намерен иметь к 2030 году 110 энергоблоков АЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/11/13/61157> (дата обращения: 18.11.2020).

3. Гончарук А. Атомная отрасль Китая: новый большой скачок? [Электронный ресурс] // Индекс безопасности. 2011. Т. 17. № 4 (99). С. 77–88.

4. Китай разработал реактор третьего поколения CAP-1400 [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2020/10/06/kitaj-razrabotal-reaktor-tretego-po/> (дата обращения: 06.10.2020).

5. Атомная энергетика до 2030 года: пять ключевых стран [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2020/07/10/105308> (дата обращения: 09.12.2020).

УДК 621.039

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОФОБИИ СРЕДИ МОЛОДЕЖИ ДЕРЕВНИ СИТЦЕВА НЯЗЕПЕТРОВСКОГО РАЙОНА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

С. Р. Нуреева¹, Н. М. Макарова²

^{1,2} Ситцевская средняя общеобразовательная школа, Ситцева, Россия

¹ nureevas.r@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению социальной проблемы — подверженности радиофобии молодежи и подростков деревни Ситцева Челябинской области. В статье радиофобия рассматривается на примере результатов опросов учащихся школы и проведения замеров радиационного фона на территории деревни.

Ключевые слова: радиация, радиофобия, «Маяк», гамма-фон, информирование, мониторинг.

THE STUDY OF RADIO-PHOBIA AMONG THE YOUTH OF THE VILLAGE SITCEVA NYAZEPETROVSKY DISTRICT CHELYABINSK REGION

S. R. Nureeva¹, N. M. Makarova²

^{1,2} Sitceva's secondary school, Sitceva, Russia

¹ nureevas.r@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of a social problem-exposure to radiophobia of young people and adolescents in the village of Sitceva, Chelyabinsk region. In the article, radiophobia is considered on the example of the results of surveys of schoolchildren and measurements of the radiation background in the territory of the village.

Keywords: radiation, radiophobia, “Mayak”, gamma-level, information, monitoring

История развития атомной отрасли тесно связана с развитием Челябинской области. В этой истории есть и печальные страни-

цы, например катастрофа на химкомбинате «Маяк», которая произошла в 1957 г. По данным общероссийской общественной организации «Зеленый патруль», Челябинская область в 2019 г. заняла последнюю строчку в экологическом рейтинге субъектов России. Авторским коллективом* исследовались отношение молодежи к экологической обстановке в Челябинской области, в т. ч. к аварии 1957 г., проводилось изучение подверженности радиофобии молодежи и подростков деревни Ситцева Нязепетровского района Челябинской области. Основной целью исследования стало выявление причин возникновения радиофобных взглядов молодежи и подростков деревни Ситцева.

Нязепетровский район занимает северо-западную часть Челябинской области. Географически он находится в пределах Среднего Урала, вблизи границы Южного Урала. Расстояние от деревни Ситцева до Озерска составляет 73 км. Виды, располагающиеся на высших ступенях экологических пирамид в этом районе, характеризуются низкими темпами развития и высокой радиочувствительностью. Кроме этого, существуют различия дозовых нагрузок на человека и биоты: в условиях аварии на комбинате «Маяк» дозы облучения некоторых животных и растений на единицу плотности радиоактивного загрязнения превышали в 10–300 раз [1]. Вокруг аварии на предприятии сложилось немало легенд и домыслов, некоторые из которых основываются на неосведомленности населения.

Боязнь радиации существовала всегда, но именно после взрыва на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) радиофобия начала захватывать все больше и больше людей. При проведении исследований обнаружилось, что радиофобия появляется из незнания, как и любой страх. Люди не обладают достаточной информацией ни о радиации, ни о том, что именно является ее источником и представляет опасность.

Социологический опрос на первом этапе проводился дважды. Анализ результатов показал неосведомленность, необразованность в вопросах использования АЭС и современных технологий, отсутствие и низкий уровень экологической культуры.

Для определения более узкой проблемы был проведен опрос молодежи и школьников деревни Ситцева о радиационном загрязнении окружающей среды. Из результатов опроса следует, что изменилось отношение к проблеме загрязнения радиацией только у 19%

* Научные консультанты: Г. Е. Эсман, педагог МБУДО «Центр детский экологический г. Челябинска», канд. педагог. наук.; В. А. Ермакова, методист ГБУДО «Областной центр дополнительного образования детей», учитель высшей категории, г. Челябинск.

опрошенных, у остальных сохранилась боязнь облучения. По остальным параметрам видна общая тенденция незначительного уменьшения негативного отношения к проблеме. Территорию считают чистой большинство опрошенных.

При анализе публикаций об атомной энергетике за два года была выявлена тенденция «старого» подхода информирования населения о современных технологиях, экономической выгоде и экологической безопасности мирного атома [2].

Оценка радиационной безопасности, измерения гамма-фона территории и построение географической информационной системы (ГИС) карт результатов измерений проводились по методике радиационного мониторинга, разработанного педагогом МБУДО «ЦДЭ» Г. Е. Эсман [3]. Методика была апробирована с 2014 г. в системе дополнительного образования образовательных организаций Челябинска, в 2016 — во Владивостоке во Всероссийском детском центре «Океан» на экологической смене «Живи, Земля!»

Главной рекой Гривенского сельского поселения, административный центр которого — д. Ситцева, является р. Суроям с многочисленными малыми притоками, один из которых делит деревню Ситцева пополам. Учитывая особенности рельефа и расположение улиц, была составлена карта-схема маршрута по сорока точкам.

Максимальное значение зафиксировано в точках 11, 15, 23 и 37: нигде на этой местности показатели радиационного загрязнения не превышают допустимых норм (рис. 1).

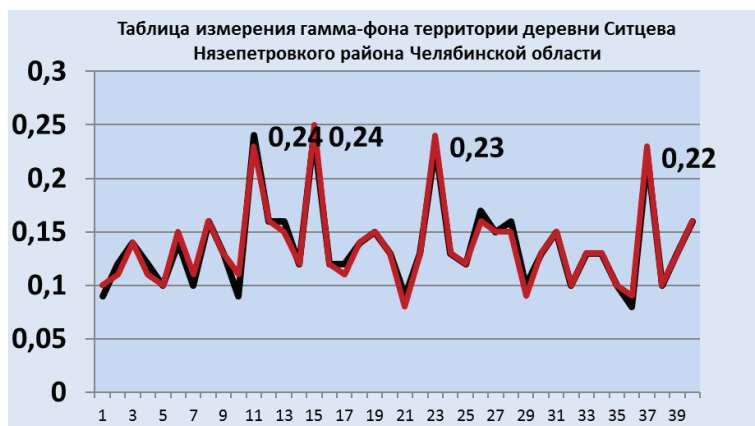


Рис. 1. Уровень гамма-фона (в мкЗв/ч) территории д. Ситцева (2017–2018 гг.)

При измерении гамма-фона территории д. Ситцева в 40 точках не были выявлены отклонения от норм радиационного фона. Самые высокие значения — 0,24 мкЗв/ч в 2017 г. и 0,25 мкЗв/ч в 2018 г. Изменение радиационного фона незначительное (среднее значение не превышает 0,2 мкЗв/ч, что является нормой). По результатам измерений была составлена карта-схема уровней гамма-фона (рис. 2).

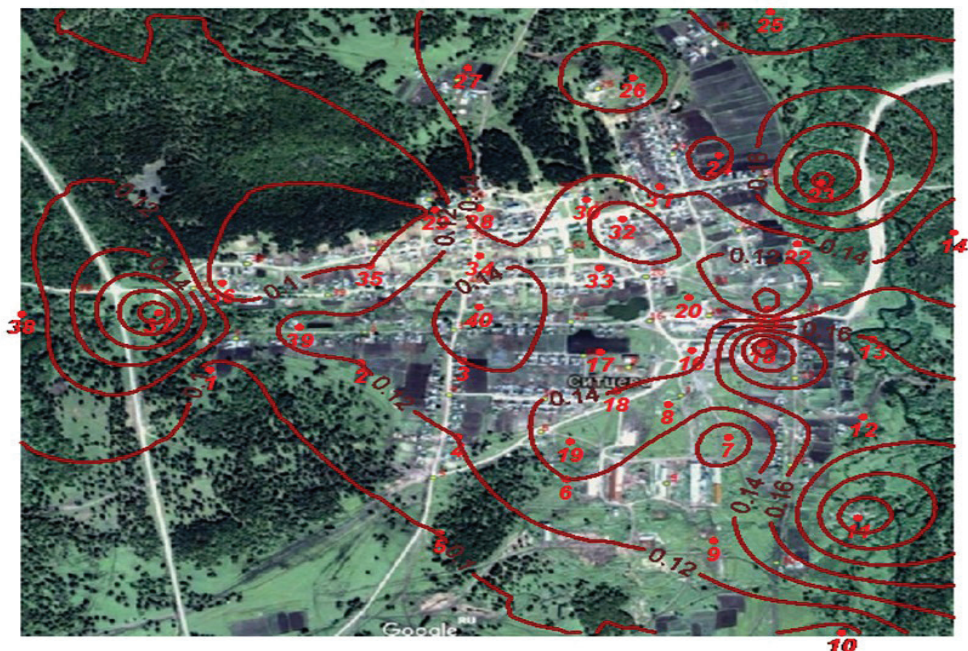


Рис. 2. Карта-схема уровней гамма-фона (в мкЗв/ч) на территории д. Ситцева с нанесенными номерами точек измерений

На территории д. Ситцева Нязепетровского района спокойная радиационная обстановка, естественный радиационный фон не изменен, превышений не обнаружено.

В ходе исследования были проанализированы причины возникновения радиофобии среди молодежи и подростков, причины социально-психологической напряженности. Анализ итогов социального опроса среди старшеклассников выявил неосведомленность в вопросах радиационной безопасности и экологической ситуации на территории Челябинской области, а также незнание истории родного края, отсутствие осведомленности о деятельности предприятия «Маяк».

Анализ источников на рассматриваемую тему выявил неблагоприятное влияние СМИ на общественное мнение; это является одной из основных причин социально-психологической напряженности.

Измерен гамма-фон территории д. Ситцева Нязепетровского района Челябинской области. По результатам измерений в 40 точках не были выявлены отклонения от норм радиационного фона.

Разработаны рекомендации по информированию жителей д. Ситцева об экологической ситуации и проведены различные мероприятия по преодолению радиофобии: публикация в СМИ «Мирный атом — наше будущее», лекции-тренинги для старшеклассников, экологические игры для младших школьников.

Список источников

1. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту / С. В. Панченко [и др.] ; под общ. ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. М. : Сам Полиграфист, 2015. 265 с.

2. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / С. В. Панченко [и др.] ; под общ. ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. М. : Сам Полиграфист, 2015. 296 с.

3. МБУДО «Центр детский экологический г. Челябинска» [Электронный ресурс]. URL: <https://cde-chel.ucoz.com/> (дата обращения: 25.11.2020).

УДК 621.039

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕНАЖЕРОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

Д. Н. Орлов¹, М. А. Вольман²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

¹ danil.danil.orlov.1999.orlov@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена актуальность программы WWER-1000 Reactor Simulation и ее востребованность для разработки и решения на ее базе новых задач.

Ключевые слова: тренажер, моделирование, реактор, атомная станция

APPLICATION OF SIMULATORS IN THE STUDY OF PROCESSES OCCURRING IN WWER-1000 NUCLEAR REACTORS

D. N. Orlov¹, M. A. Volman²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

¹ danil.danil.orlov.1999.orlov@mail.ru

Abstract. The paper considers the relevance of the WWER-1000 Reactor Simulation program and the relevance of this program for developing new tasks based on it.

Keywords: simulator, modelling, reactor, a nuclear power plant

Применение программ моделирования процессов в ядерном реакторе, тренажеров и различного рода симуляторов является одним из доступных и эффективных способов приобретения практических знаний в учебных заведениях и подготовки квалифицированного персонала для работы на АЭС. В наше время нельзя представить современное проектирование и строительство атомных станций без применения предварительных компьютерных (математических) моделей для имитирования (моделирования) процессов, происходящих в проектируемом реакторе.

Появление новых инновационных технологий и решений для повышения параметров современных реакторов приводит к усложнению такой технической системы и затрудняет процесс моделирования с помощью обычных теоретических методов (или делает его совсем невозможным). Для получения более точных данных можно применить натурную модель, но подобный способ будет высокочрезвычайно затратным и опасным экспериментом. На основе вышесказанного можем сделать вывод, что оптимальным вариантом исследования реакторов является применение компьютерных моделей.

Нами рассмотрен симулятор WWER-1000, разработанный компанией «ЭНИКО ТСО» [1–3]. Платформа «ЭНИКАД», на основе которой разработан симулятор, позволяет строить модели на основании проектно-конструкторских материалов в полном объеме с их особенностями, уже учитывая конкретную реализацию разработанных алгоритмов на выбранной элементной базе.

С помощью такого тренажера могут решаться следующие задачи:

- 1) с переходными процессами (пуск и останов) определение влияния ксеноновых колебаний при различном времени погружения;
- 2) определение степени выгорания топлива локально и по зоне;
- 3) имитация сбоев систем 1-го и 2-го контуров;
- 4) работа реактора с номинальной мощностью;
- 5) определение распределения температуры по области активной зоны;
- 6) борное регулирование в ручном и автоматическом режиме;
- 7) изучение влияния параметров теплоносителя реактора на его работу при регулировании параметров в автоматическом или ручном режиме;
- 8) определение влияния реактивности.

При этом все названные задачи могут выполняться для исходных состояний с высоким и низким обогащением загружаемого топлива.

Востребованность программы легко обосновывается. Симулятор работает на персональном компьютере в режиме реального времени и обеспечивает динамический ответ с достаточной точностью. Он дает возможность отработать задачи с переходными процессами реактора, которые являются наиболее ответственными и технически сложными. Тренажер частично имитирует фактические приборы панели управления, а также предоставляет дополнительные аспекты для анализа.

Симулятор обладает широкими возможностями. Помимо уже реализованных разработчиками задач, актуальным является разработка дополнительных задач, что и является целью нашей работы. Кроме того, нами ведется создание комплексных задач на основе доступных заданий, включающих теоретическую часть, моделирование нейтронно-физических процессов на основе уравнений точечной кинетики в среде Mathcad [4] и симуляцию процессов на обозначенном тренажере.

Такой подход к применению тренажера при изучении процессов, протекающих в ядерных реакторах, на наш взгляд, может повысить эффективность как непосредственно внедрения симулятора, так и учебного процесса в целом.

Список источников

1. ЭНИКАД [Электронный ресурс]. URL: <http://eniko.ru/etssite/tech/enicad.php> (дата обращения: 01.12.2020).
2. VVER1000 Simulator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors/nuclear-reactor-simulators-for-education-and-training/vver-1000-simulator> (date of access: 01.12.2020).
3. Руководство по пользованию симулятором [Электронный ресурс]. URL: <https://uchebilka.ru/pravo/122466/index.html> (дата обращения: 01.12.2020).
4. Семенов В. К., Вольман М. А. Кинетика ядерных реакторов (теория, математическое и имитационное моделирование). Иваново : Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2015. 271 с.

УДК 621.59:620.92

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ АЭС ЗА СЧЕТ КРИОГЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. Н. Потеряев¹, И. А. Сивинских², И. Э. Розаненков³, С. Е. Щеклеин⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ poteriaev.stas@yandex.ru

Аннотация. В работе представлено одно из возможных решений повышения маневренности атомных электростанций (АЭС) — использование криогенных технологий накопления энергии. Проанализирован ряд циклов ожижения для поиска наиболее эффективного.

Ключевые слова: жидкий воздух, криоэнергетика, циклы ожижения воздуха, аккумулирование энергии

INCREASED MANEUVERABILITY OF NUCLEAR POWER PLANTS DUE TO CRYOGENIC TECHNOLOGIES

S. N. Poteryaev¹, I. A. Sivinskikh², I. E. Rozanenko³, S. E. Shcheklein⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ poteriaev.stas@yandex.ru

Abstract. This work presents one of the possible solutions to increase the maneuverability NPP — use of cryogenic energy storage technologies. Several liquefaction cycles analyzed to find the most effective one.

Keywords: liquid air, cryoenergy, air liquefaction cycles, energy storage

Разработка способов повышения маневренности атомных электростанций (АЭС) позволит энергоблокам участвовать в регулировании суточного графика электрической нагрузки, что существенно повысит их конкурентность на рынке, а также повысит надежность энергосистемы в целом. Идеальным способом маневрирования будет

тот, при котором изменения режимов работы самой реакторной установки будут минимальными [1].

Одним из активно развиваемых в мире способов накопления энергии, т. е. создания возможности маневрирования выдаваемой в сеть мощностью, является получение такой энергоемкой среды, как сжиженный воздух (системы LAES).

Рассмотрим установку (рис. 1), разработанную компанией Highview power storage [2], использующую циклы ожизнения методом адиабатического расширения газа в детандере [3].

Процессы, происходящие в установке, делятся на три этапа:

- 1) сжижение воздуха по циклу среднего давления (т. е. «заряд» аккумулятора);
- 2) хранение сжиженного воздуха (с параметрами -196°C , 1 бар);
- 3) получение энергии путем подогрева и регазации воздуха и пропуски его через турбину.

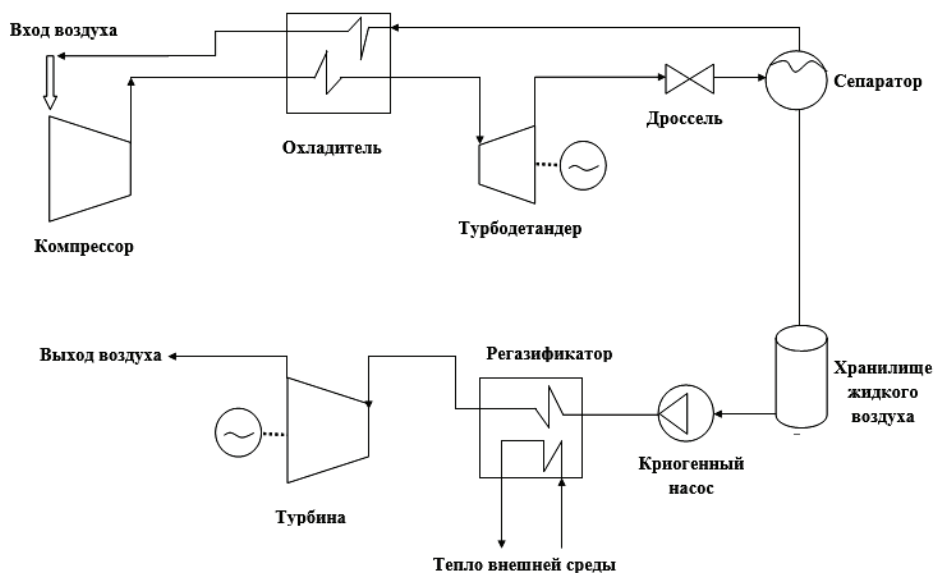


Рис. 1. Схема установки Highview power storage

Эффективность, достигаемая такой установкой, составляет более 50 % (при использовании тепла окружающей среды). При подогреве сбросовым теплом уходящих газов теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) ($110...115^{\circ}\text{C}$) эффективность доходила до 70 % [4].

Для совершенствования такой технологии выполнено моделирование с помощью программы Aspen Hysys [5]. Схема для цикла условно разделена на 2 части: ожижительная часть (рис. 2) и турбинная часть.

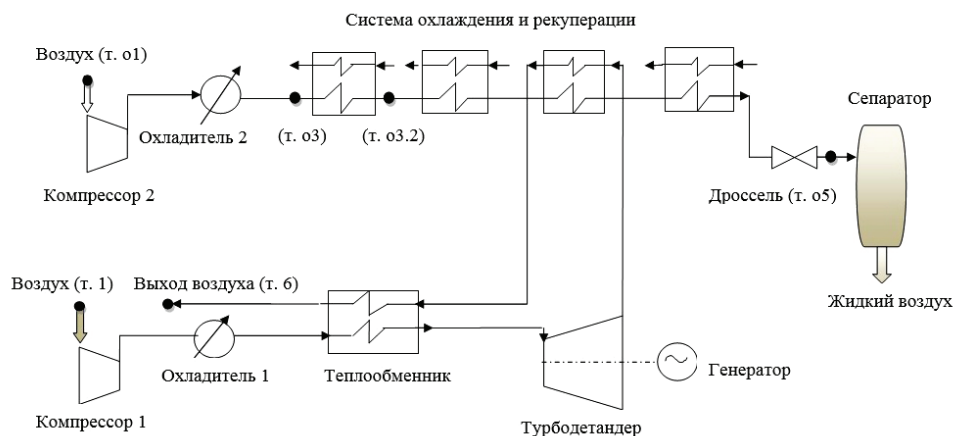


Рис. 2. Схема ожижительной части установки

При построении модели принято, что используется промежуточное охлаждение между ступенями компрессора. Ожижение воздуха происходит следующим образом:

- 1) линия 1...6 является замкнутой, предназначена для отвода основного количества тепла от линии 01...05;
- 2) линия 01...05 является линией ожижения. Этап 03...03.2 моделирует проход воздуха через аккумулятор холода (эффективность $AX = 70\%$).

Перед турбиной жидкий воздух сжимается до давления 70 бар и подогревается до температуры 30 °С. Турбина пятиступенчатая с промежуточным подогревом.

Общую эффективность цикла находим по формуле:

$$\eta_{\text{цикла}} = \eta_{\text{ож}} \eta_{\text{турб}},$$

где $\eta_{\text{ож}}$ — эффективность ожижительной части; $\eta_{\text{турб}}$ — эффективность турбинной части.

Эффективность ожижительной части определяем как:

$$\eta_{\text{ож}} = \frac{l}{0,2},$$

где l — удельная работа на получение 1 кг жидкого воздуха, (кВт · ч)/кг [6]; 0,2 — минимальная работа на получение 1 кг жидкого воздуха [6].

Эффективность турбинной части находим по формуле:

$$\eta_{\text{турб}} = \frac{Q_1}{Q_2},$$

где Q_1 — энергия, выработанная в турбине, кВт; Q_2 — энергия, затраченная на подогрев воздуха, кВт.

Результаты расчетов при разных давлениях сжатия (при использовании тепла окружающей среды) представлены в таблице.

Таблица

Сравнение циклов работы установки

Цикл	Давление сжатия, бар	l , (кВт · ч)/кг	$\eta_{\text{цикла}}$
Цикл среднего давления	40	0,60	0,48
Цикл промежуточного давления	150	0,51	0,59
Цикл высокого давления	200	0,49	0,61

По данным, представленным в таблице, можно сделать вывод, что самым эффективным является цикл на высоком давлении, что совпадает с существующими данными [6]. Подобные криоэнергетические установки (LAES) обладают рядом преимуществ: они не привязаны к географическому положению станции, компактны и просты в строительстве и обслуживании.

Список источников

1. Беркович В. М., Горохов В. Ф., Татарников В. П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций // Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Highview power [Electronic resource]. URL: <https://www.highviewpower.com/> (date of access: 20.10.2020).
3. Физика низких температур / Дж. Доунт [и др.] ; ред. пер. А. И. Шальников. М. : Изд-во иностр. лит., 1959. 937 с.
4. Санников В. Криоэнергетика: криогенная электростанция [Электронный ресурс] // Популярная механика. 2012. № 6. URL: <https://www.>

popmech.ru/technologies/12689-prodavtsy-vozdukha-krioenergetika/ (дата обращения: 08.10.2020).

5. Краснобородько Д. А., Кулишенко Р. Ю., Холоднов В. А. Моделирование экстрактивной ректификации с помощью информационно-моделирующей программы Aspen Hysys. СПб. : СПбГТИ (ТУ), 2018. 62 с.

6. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1967. 847 с.

УДК 621.039.7

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

И. А. Сивинских¹, С. Н. Потеряев², И. Э. Розаненков³, О. Л. Ташлыков⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ rozanenkov.ilya@yahoo.com

Аннотация. В работе представлено описание процессов 3D-моделирования технологических систем, оборудования и процессов на примере комплекса по переработке радиоактивных отходов (отделение Фокино Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами «ДальРАО» — филиала «Федерального экологического оператора»). Рассмотрены этапы создания моделей технологических систем и оборудования, а также их размещения на плане здания в ПО Autodesk Revit 2018. Показан пример разработки технологического процесса.

Ключевые слова: переработка радиоактивных отходов, 3D-моделирование, Autodesk Revit 2018, дезактивация

3D-MODELING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS AND PROCESSES OF THE RADIOACTIVE WASTE RECYCLING COMPLEX

I. A. Sivinskikh¹, S. N. Poteryaev², I. E. Rozanenko³, O. L. Tashlykov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ rozanenkov.ilya@yahoo.com

Abstract. The paper describes the processes of 3D-modeling of technological systems, equipment and processes on the example of a complex for recycling radioactive waste — Fokino department. The stages of creating models of technological systems and equipment, as well as their placement on the building plan in Autodesk Revit 2018 software are considered. An example of the technological process development is shown.

Keywords: radioactive waste recycling, 3D-modeling, Autodesk Revit 2018, decontamination

Визуальное отображение технологических систем и процессов требуется инженерам не только при проектировании и строительстве какого-либо объекта, но и для внешних нужд: презентации проекта заказчику, общественности, чтобы каждый мог легко уяснить суть и разобраться в проекте.

Создание трехмерных моделей является наиболее эффективным и экономичным способом наглядного иллюстрирования объектов, оборудования и всего процесса в целом. Это позволяет избежать лишних финансовых затрат, сэкономить человеко-часы — способствовать повышению экономической эффективности технологического процесса при его реализации.

Рассмотрим пример использования программы 3D-моделирования Autodesk Revit 2018 при создании проекта отделения Фокино Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами (ДВЦ) — филиала «Федерального экологического оператора».

Региональный центр кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов в Приморском крае (РЦКДХ) предназначен для переработки и приведения в безопасное состояние радиоактивных отходов (РАО), накопленных в хранилищах «ДальРАО», а также образующихся в процессе эксплуатации, и вывода из эксплуатации объектов Дальневосточного центра (ДВЦ), обеспечения приема и переработки радиоактивных материалов, образованных в результате деятельности предприятий Дальневосточного региона и Военно-морского флота РФ [1].

Технологический процесс непосредственной переработки отходов состоит из следующих операций:

- 1) входной контроль контейнеров с РАО;
- 2) сортировка РАО по морфологическому составу;
- 3) фрагментация РАО до размеров, обусловленных последующим технологическим процессом: прессование, деактивация, размещение в бочках, сжигание;
- 4) размещение переработанных твердых радиоактивных отходов (ТРО) в контейнерах, их герметизация и отправка на временное хранение.

С помощью программы Autodesk Revit 2018 возможно: моделировать оборудование, при этом сразу осуществлять проверку совместимости деталей (правильности чертежей); создавать точки подключения сред, вентиляции и электроснабжения; создавать необходимую проектную и рабочую документацию.

На стадии размещения готовых моделей на общем плане объекта проводится проверка на коллизию объектов (рис. 1), а также предусматриваются необходимые технологические пространства. После подключения необходимых сред и систем к оборудованию, представляется возможным наглядно моделировать технологические процессы обращения с РАО (рис. 2).

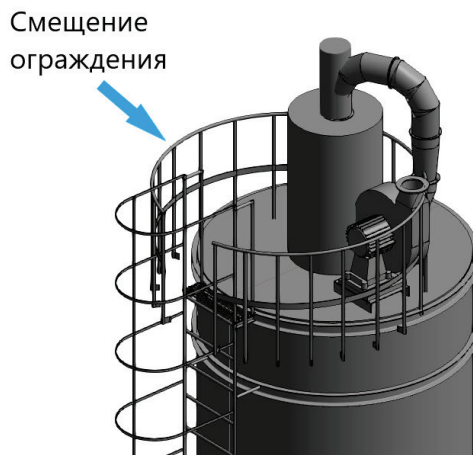


Рис. 1. Коллизия деталей

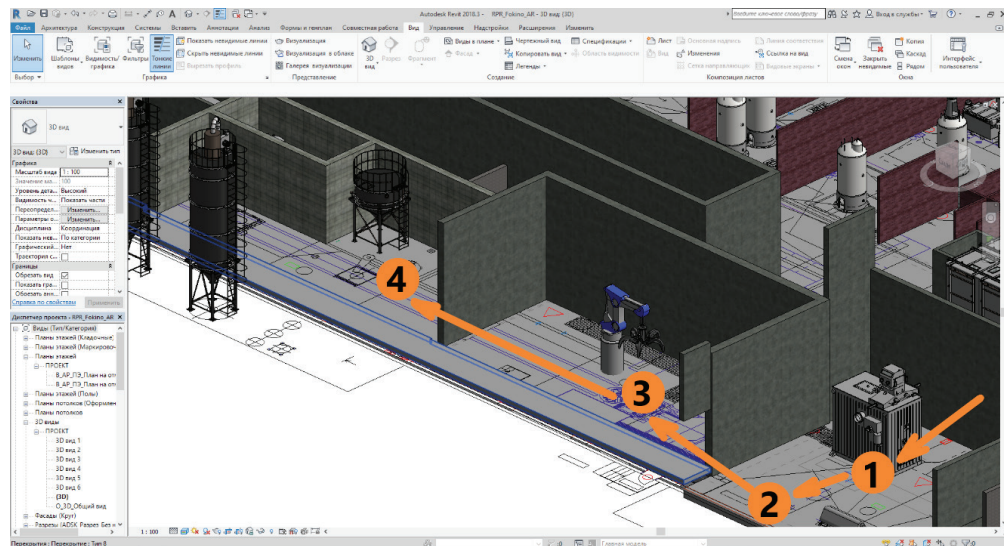


Рис. 2. Общий вид узла прессования, сжигания и цементирования комплекса

Общая 3D-модель помещения с оборудованием позволяет:

- 1) определить возможные несостыковки в технологических процессах;
- 2) оценить «заполненность» помещений, найти возможные места образования заторов;
- 3) оптимизировать маршруты персонала в зонах работы с ионизирующими источниками излучения (ИИИ) [2; 3];
- 4) предусмотреть маршруты и пути следования грузоподъемного оборудования и средств перемещения грузов;
- 5) обеспечить совмещение во времени выполнения основных и вспомогательных операций.

Перспективным направлением оптимизации радиационной защиты персонала является использование виртуальных моделей радиационно-опасных объектов для решения задач маршрутизации радиационно-опасных работ. Основной целью решения задач маршрутной оптимизации является нахождение минимума функционала качества — суммарной дозы облучения при выполнении комплекса работ в нестационарных радиационных полях [4].

Список источников

1. Оценка воздействия намечаемой деятельности на период эксплуатации зданий и сооружений регионального центра кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов в Приморском крае на окружающую среду (ОВОС 1) [Электронный ресурс]. 2015. Ч. 1, кн. 1. 252 с. URL: <http://cbsfokino.ru/files/dalraokniga2.pdf> (дата обращения: 06.12.2020).
2. Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е. Виртуальные технологии обучения в решении проблемы снижения облучаемости ремонтного персонала // Дистанц. и вирт. обучение. 2010. № 8. С. 48–57.
3. О роли обучения в решении задачи сокращения времени пребывания персонала в полях ионизирующего излучения / Н. В. Смирных [и др.] // Тр. третьей науч.-техн. конф. молодых ученых УралЭНИН УрФУ. Екатеринбург : УрФУ, 2018. С. 311–314.
4. Завадский Д. И., Ташлыков О. Л. Оптимизация радиационной защиты персонала с использованием BIM-проектирования // Физика. Технологии. Инновации : сб. ст. VII Международ. молодеж. науч. конфе. Екатеринбург : УрФУ, 2020. С. 347–358.

УДК 621.039

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

И. А. Сивинских¹, С. Н. Потеряев², И. Э. Розаненков³, О. Л. Ташлыков⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ siwinskih100@gmail.com

Аннотация. В работе представлены конструкции перегрузочных устройств, используемые на реакторах с жидкометаллическим теплоносителем. Проанализированы преимущества и недостатки различных способов перегрузки.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, натрий, перегрузочные устройства, перегрузка ядерного топлива, поворотные пробки, «горячая камера»

THE FAST NEUTRON REACTOR OVERLOADING DEVICE CONSTRUCTION

I. A. Sivinskikh¹, S. N. Poteryaev², I. E. Rozanenko³, O. L. Tashlykov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ siwinskih100@gmail.com

Abstract. The paper presents the construction of overloading devices used in reactors with a liquid metal coolant. The advantages and disadvantages of different overloading methods were analyzed.

Keywords: fast neutron reactor, sodium, reloading devices, nuclear fuel overloading, rotary plugs, “hot chamber”

При достижении запланированной глубины выгорания тепло-выделяющих сборок (ТВС) активной зоны требуется их выгрузка и замена новыми (аналогично для сборок зоны воспроизводства).

Система перегрузки топлива в реакторах на быстрых нейтронах имеет следующие особенности:

1) необходимость обеспечения герметичности реактора в процессе перегрузки из-за высокой химической активности теплоносителя (в основном используется Na или эвтектика NaK);

2) глубокое выгорание топлива и высокая удельная энергонапряженность требуют надежного охлаждения выгружаемого топлива.

Следует отметить, что конструкция реактора должна обеспечивать максимальную простоту операций, а время операции должно быть минимальным. По этой причине способ перегрузки топлива оказывает большое влияние на саму конструкцию реактора.

Системы перегрузки реакторов, используемые на реакторах с натриевым теплоносителем, обычно подразделяются на два вида: устройства с вращающимися пробками и устройства типа «горячей камеры».

Способ «горячей камеры» (рис. 1, а) подразумевает установку сверху реактора небольшой герметичной камеры, которая является защитным экраном при удаленной на время перегрузки топлива крышке корпуса реактора и осуществлении перегрузки топлива [1]. Конструкция крышки в этом случае очень проста. Этот метод имеет следующие достоинства:

1) возможность наблюдения за ходом работы с помощью телевизионной камеры;

2) создание в «горячей камере» нейтральной среды, предотвращающей взаимодействие теплоносителя с атмосферой;

3) применение «горячей камеры» облегчает герметизацию верхней пробки.

Недостатком является то, что во время работы на стенки и перегрузочные устройства налипают пары радиоактивного теплоносителя, а также то, что из-за «горячей камеры» существенно увеличиваются размеры реактора [1].

Способ с вращающимися верхними пробками (рис. 1, б) заключается в манипулировании тепловыделяющей сборки (ТВС) с помощью механизма перегрузки и механизмов введения и вывода сборок. Для функционирования этих механизмов могут быть использованы одинарные, двойные и тройные поворотные пробки [2–4].

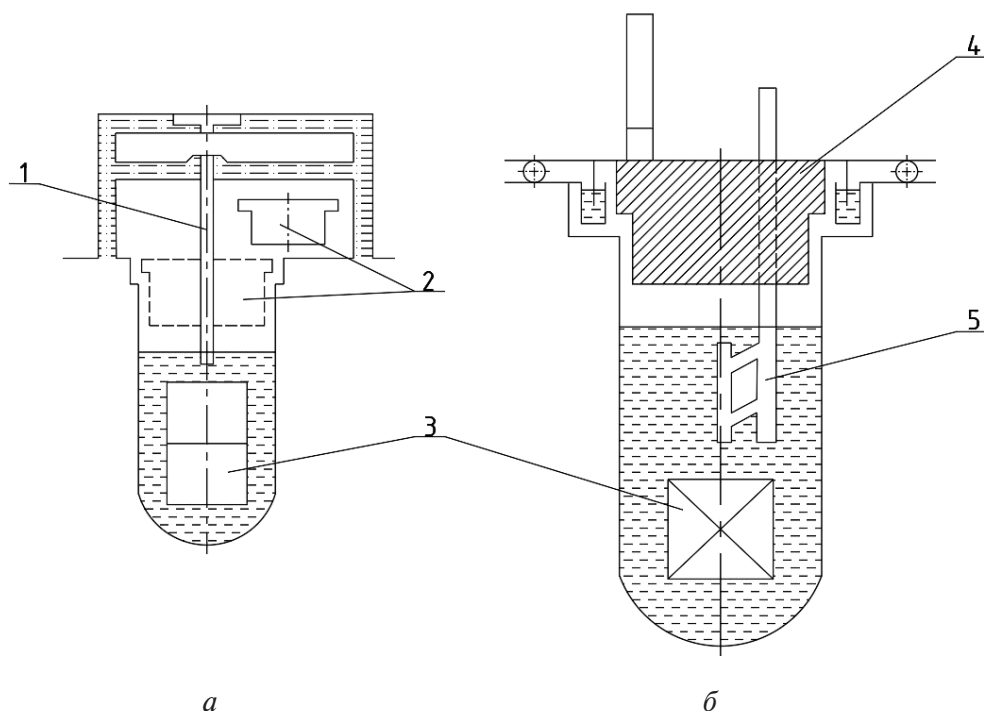


Рис. 3. Схемы перегрузки реактора на быстрых нейтронах с «горячей камерой» (а) и одинарной поворотной пробкой (б):

1 — механизм перегрузки; 2 — выемная пробка реактора;
3 — активная зона; 4 — поворотная пробка; 5 — манипулятор

Механическое уплотнение выполнено по всему периметру пробок в виде гидрозатвора: каждая пробка имеет цилиндрическую юбку, опущенную в кольцевую ванну для исключения выхода из реактора радиоактивного газа. Ванна заполнена тяжелым уплотняющим металлом, герметично связанным с полостью реактора. Например, для БН-350 уплотняющая среда представляет собой сплав висмута с оловом (43 % Bi, 57 % Sn) с температурой плавления 138 °С и плотностью $8,3 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Для перегрузки ТВС сплав предварительно расплавляют электронагревателями, вмонтированными в корпус гидрозатвора [5; 6].

В настоящее время на реакторах на быстрых нейтронах (РБН) в основном используется система с двумя-тремя эксцентрично расположенными поворотными пробками (рис. 2).

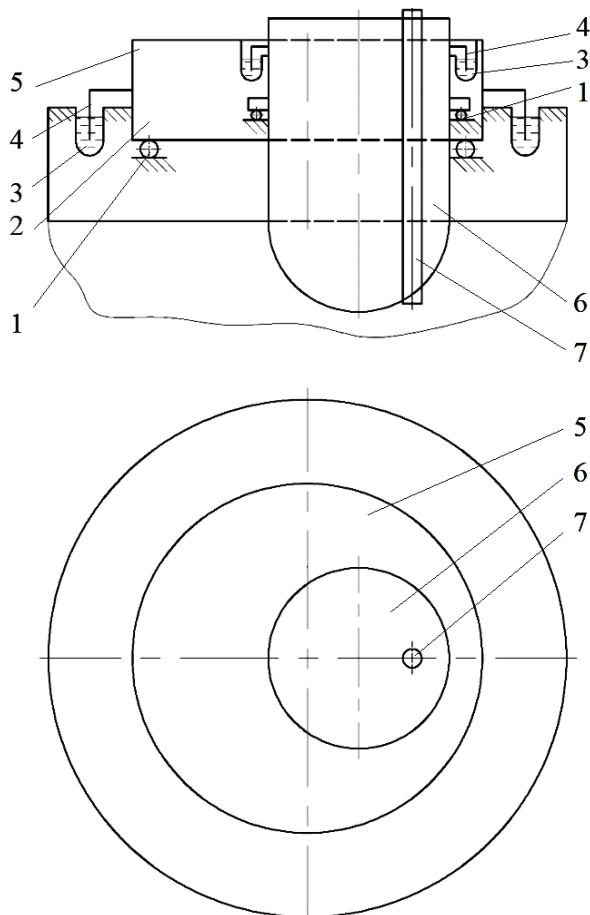


Рис. 2. Схема перегрузки с двумя поворотными пробками:

1 — шаровые опоры; 2, 5 — большая поворотная пробка;
3 — кольцевая ванна; 4 — юбка; 6 — центральная поворотная колонна
(малая поворотная пробка); 7 — захват

Список источников

1. Будов В. М., Фарафонов В. А. Конструирование основного оборудования АЭС. М. : Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
2. Уордсуорт А. Д. Техника работы с ядерным топливом / пер. с англ. Ю. Н. Бурмистренко. М. : Атомиздат, 1965. 255 с.
3. Innovative Steam Generator for Sodium-Cooled Fast Reactors [Electronic resource] / Lorenzo Fiorentino. Roma / 2006. URL: <https://www.tesionline.it/tesi/23539/innovative-steam-generator-for-sodium-cooled-fast-reactors> (date of access: 06.12.2020).

4. Корольков А. С., Гаджиев Г. И., Ефимов В. Н. Опыт эксплуатации реакторной установки БОР-60 // Атом. энергия. 2001. Т. 91, вып. 5. С. 363–369.

5. Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В. Реакторы на быстрых нейтронах / под ред. Ф. М. Митенкова. М. : Энергоатомиздат, 1985. 288 с.

6. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : в 2 ч. / А. И. Бельтюков [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург : УрФУ, 2013. Ч. 1. 548 с.

УДК 621.039

ОЦЕНКА ЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЕ

Е. Д. Стругов¹, И. А. Ширманов², В. А. Климова³, О. Л. Ташлыков⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ topzar76123@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты расчета экранирующих свойств ряда природных минералов и отходов производства для оценки возможности их использования в качестве радиационной защиты от гамма-излучения.

Ключевые слова: оптимизация радиационной защиты, природные материалы, линейный коэффициент ослабления

ASSESSMENT OF SHIELDING PROPERTIES OF NATURAL MINERALS AND PRODUCTION WASTE FOR USE IN RADIATION PROTECTION

E. D. Strugov¹, I. A. Shirmanov², V. A. Klimova³, O. L. Tashlykov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ topzar76123@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of calculating the shielding properties of a number of natural minerals and industrial wastes to assess the possibility of their use as radiation protection against gamma radiation.

Keywords: optimization of radiation protection, natural materials, linear attenuation coefficient

Радиационная безопасность в современных условиях сложилась в самостоятельную отрасль науки, призванную обеспечить безопасное для человека и окружающей среды широкое использование источников излучения [1].

Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может достигать 20–30 % общей стоимости сооружения. В настоящее время особое внимание уделяется реализации принципа оптимизации — одного из основных принципов обеспечения радиационной безопасности. В связи с этим представляет интерес оценка экранирующих свойств по отношению к гамма-излучению различных производственных отходов, природных минералов для оптимизации радиационной защиты.

В целях решения этой задачи в представленной работе использовалась база данных NIST XCOM, с помощью которой можно получить поперечные сечения рассеяния для фотона, фотоэлектрическое поглощение, значения общих коэффициентов затухания для любого элемента, соединения или смеси [2].

Следует отметить некоторые ограничения. Поперечные сечения элементов в базе данных NIST XCOM относятся к изолированным нейтральным атомам и не учитывают молекулярные и твердотельные эффекты, которые изменяют сечения поглощения, такие как сечения рассеяния Дельбрюка, двухфотонного комптоновского рассеяния или фотомезонного происхождения.

В настоящей работе исследованы некоторые природные материалы и шлаки в целях определения их эффективности при использовании в составе защиты от гамма-излучения. Среди большого разнообразия материалов на рынке были выбраны следующие материалы (нумерация материалов совпадает с нумерацией в таблице и на рис. 1):

- 1) аллювиальный гранатовый песок;
- 2) дистен-силлиманитовый концентрат зернистый;
- 3) ильменитовый концентрат (обесхромленный);
- 4) рутиловый концентрат зернистый (типичный);
- 5) циркониевый концентрат порошкообразный;
- 6) доменный гранулированный молотый шлак;
- 7) гранит (крошка).

Для сравнения и оценки эффективности исследуемых материалов рассматривалось ослабление гамма-излучения свинцом и оловом. Значения, полученные с помощью XCOM, сравнивались с расчетом по существующей методике [3]. Расчет проводился для точечного источника. При расчете массового коэффициента ослабления в качестве источника излучения использовался ^{60}Co (наиболее вероятным является каскадное испускание гамма-квантов с энергией 1,17 МэВ и 1,33 МэВ).

Таблица

Основной химический состав материалов, % мас.

Материалы	Образцы материалов						
	1	2	3	4	5	6	7
Плотность, кг/м ³	2380	1900	2200	2400	2700	2800	2700
SiO ₂	36	—	2	1,3	32	—	68
Al ₂ O ₃	20	58	3	0,4	1	10	12
FeO	30	—	—	—	—	0,5	0,5
Fe ₂ O ₃	2	0,8	—	1	0,09	—	0,5
TiO ₂	1	2	63	95	0,2	3	0,1
MnO	1	—	—	—	—	1,5	—
CaO	2	0,1	—	0,5	—	40	1,5
MgO	6	0,2	—	—	—	13	0,1
N ₂ O + K ₂ O	—	0,1	—	—	—	—	—
U + Th	—	220 · 10 ⁻⁶	100 · 10 ⁻⁶	70 · 10 ⁻⁶	320 · 10 ⁻⁶	—	—
ZrO ₂	—	0,8	—	0,8	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	0,4	0,2	—	—	—
P ₂ O ₅	—	—	—	0,07	0,12	—	—
SO ₃	—	—	—	0,05	—	—	—
V ₂ O ₅	—	—	—	0,4	—	—	—
ZrO ₂ +HfO ₂	—	—	—	—	65	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	0,5	—
K ₂ O	—	—	—	—	—	1,5	—

Для расчета использовалась формула зависимости интенсивности излучения от толщины защитной стенки:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 — интенсивность в начальный момент времени; μ — линейный коэффициент ослабления, см⁻¹; x — толщина защитной стенки, см.

Линейный коэффициент ослабления энергии определялся с помощью базы данных NIST XCOM при толщине слоя вещества 10 см.

На рис. 1 представлены значения линейного коэффициента ослабления для девяти материалов, включая свинец и олово.

По итогам выполненной работы можно сделать вывод, что наиболее эффективным из исследуемых материалов для ослабления гамма-излучения оказался доменный гранулированный молотый шлак и цир-

кониевый концентрат порошкообразный. Это объясняется наибольшим линейным коэффициентом ослабления.

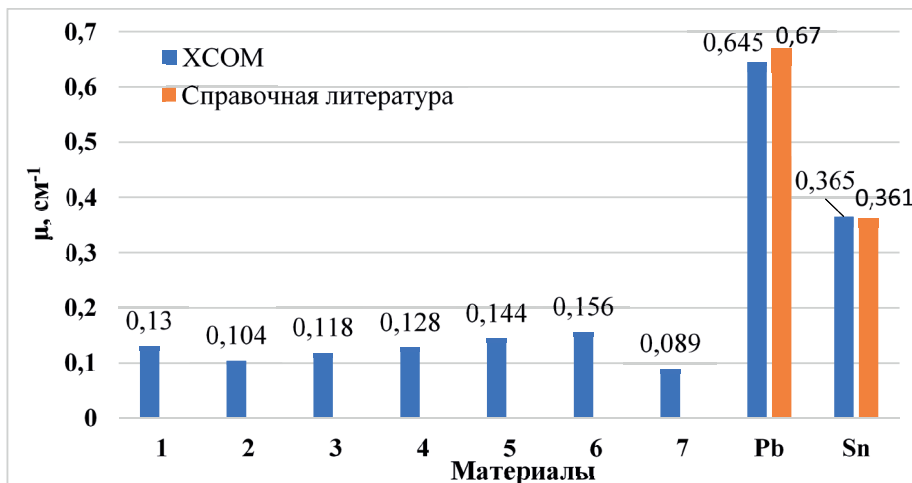


Рис. 1. Значения линейного коэффициента ослабления

Настоящие материалы достаточно распространены на рынке и имеют невысокую стоимость, что характеризует их доступность в применении. Результаты показали, что применение природных материалов для защиты от гамма-излучения возможно и может быть осуществлено в условиях, не требующих ограничения для толщины защиты.

В работе был рассмотрен моноэнергетический пучок гамма-квантов. Исследование материалов в дальнейшем будет продолжено с учетом разных показателей энергии.

Список источников

1. Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций / под общ. ред. Н. А. Доллежаля. М. : Энергоиздат, 1982. 271 с.
2. Element/Compound/Mixture Selection [Electronic resource]. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (date of access: 10.11.2020).
3. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений. М. : Энергоатомиздат, 1995. 494 с.

УДК 621.039

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

Та Ван Тхыонг¹, Ха Хюи Мань², О. Л. Ташлыков³

^{1,3} Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Компания технического обслуживания номер 1, Ханой, Вьетнам

¹ tavanthuong_tvt@yahoo.com.vn

Аннотация. В работе представлена история развития энергетики Вьетнама. Приведены данные по структуре энергопроизводства Вьетнама, планы развития энергетики, включая строительство атомной электростанции «Ниньтхуан».

Ключевые слова: энергетика, гидроэлектростанция, ветроэнергетика, солнечная энергетика, атомная электростанция, экология

DEVELOPMENT OF VIETNAM ENERGY

Ta Van Thuong¹, Ha Huy Manh², O. L. Tashlykov³

^{1,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² Maintenance company number 1, Hanoi, Vietnam

Abstract. In this work the history of Vietnam's energy development is presented. Data on the structure of Vietnam's energy production, energy development plans, including the construction of the "Ninh Thuan" NPP, are presented.

Keywords: energy, hydroelectric power plant, wind power, solar power, nuclear power plant, ecology

Электроэнергетика Вьетнама после почти 80 лет создания и развития стала основой для социально-экономического развития страны. Первой электростанцией во Вьетнаме является гидроэлектростанция (ГЭС) «Анкроет», построенная французами на р. Суой Ванг в д. Дан Киа (коммуна Лат Дуонг в провинции Лам Донг). Строительство началось в октябре 1942 г., открыли ГЭС в октябре 1945 г.

ГЭС «Анкрост» была модернизирована Южной энергетической корпорацией до 4,4 МВт и работает до сих пор. С помощью Советского Союза в 1972 г. Вьетнам построил первую крупную ГЭС «Тхак Ба» (108 МВт) на р. Чай, правом притоке р. Ло. Из-за многократных американских бомбардировок ГЭС была сильно повреждена и восстановлена только в 1975 г. ГЭС «Тхак Ба» вместе с ТЭС «Уонг Би» обеспечили надежную выработку электроэнергии для нужд Северного Вьетнама. На рис. 1 приведены основные этапы развития электроэнергетики Вьетнама.

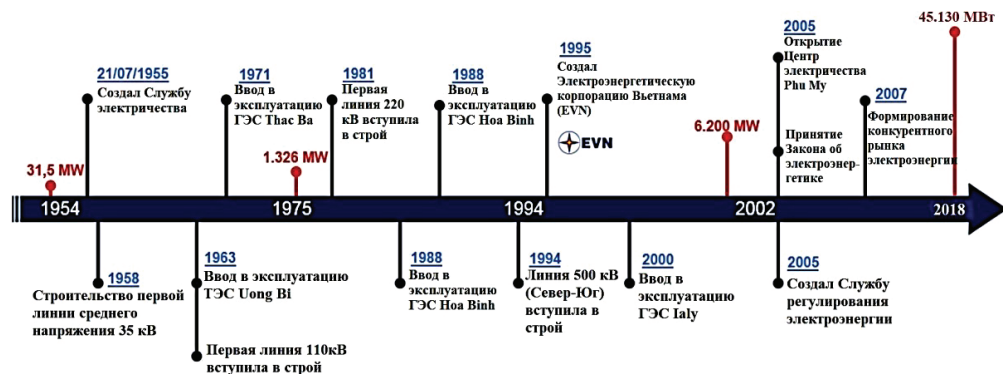


Рис. 1. Этапы развития электроэнергетики Вьетнама:

- 1954—1975 — от войны к объединению страны;
- 1976—1994 — восстановление и построение основы;
- 1995—2002 — совершенствование и развитие;
- 2003—2018 — реструктурирование

Сейчас две части энергосистемы Вьетнама (Север и Юг) объединены в единую систему с помощью двух линий ЛЭП-500 кВ длиной около 8000 км. Вьетнам обладает значительным количеством источников энергии (ГЭС, тепловые электростанции (ТЭС), работающие на угле, газе, мазуте, возобновляемые источники энергии и др.). В настоящее время страна занимает второе место в Юго-Восточной Азии и 23-е место в мире по производству электроэнергии [1].

Потенциал гидроэлектроэнергии Вьетнама довольно велик и почти полностью использован (рис. 2). По оценкам, суммарная мощность ГЭС может достигать более 30 тыс. МВт. К 2017 г. мощность крупных и средних ГЭС достигла 16192 МВт.

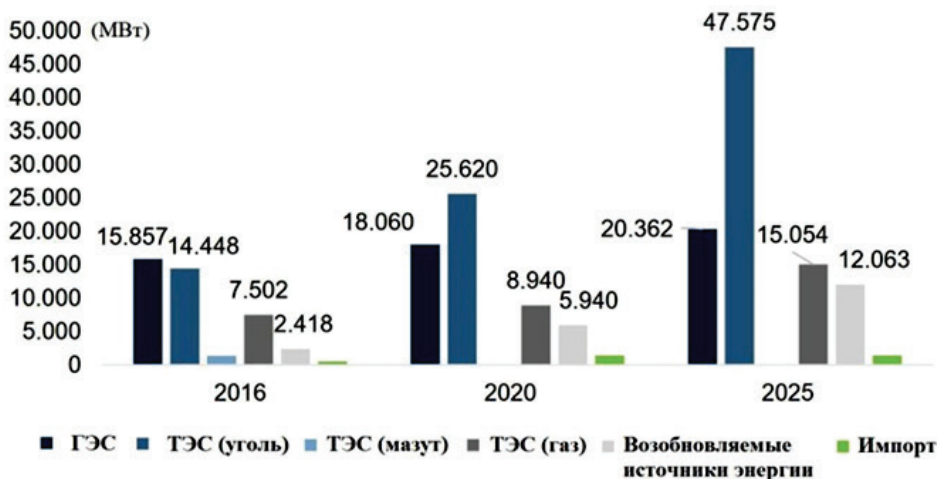


Рис. 2. Структура источников электроэнергии Вьетнама по Плану электроэнергетики VII

В настоящее время добыча угля во Вьетнаме достигает 40–45 млн т в год, обеспечивая большую часть внутреннего спроса и экспорт. Основными поставщиками угля являются Австралия, Индонезия и Россия. Вьетнам является страной со средними запасами природного газа, основная часть которых находится в бассейнах рек Кыу Лонг, Нам Кон Сон, Малай-Тхо Чу, Ты Чинь-Вунг Май и частично в бассейне Фу Хань и Хонгха.

Вьетнам считается страной с высоким потенциалом развития ветроэнергетики (по оценкам, от 1800 до 9000 МВт). Наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают побережье центрального района на юге, центральное нагорье и острова. Являясь сельскохозяйственной страной, Вьетнам обладает огромным количеством биомассы для производства энергии (около 150 млн т в год). Вьетнам также обладает значительным потенциалом солнечной энергии, которую можно использовать для получения горячей воды, производства электроэнергии и других целей (например, сушки, приготовления пищи). Это является основой для развития солнечных энергетических технологий. Геотермальные ресурсы страны подробно не исследованы. По предварительным оценкам их электроэнергетический потенциал достигает 300 МВт.

Согласно постановлению премьер-министра Вьетнама № 01/2006/QĐ-ТТг от 03.01.2006 «Об утверждении Стратегии мирно-

го применения атомной энергии до 2020 г. » Вьетнам должен был построить атомную электростанцию (АЭС) мощностью 2000–4000 МВт к 2020 г. После аварии в 2011 г. на АЭС «Фукусима-1» все вопросы, связанные с обеспечением безопасности будущей АЭС, исследовались повторно. АЭС «Фьюкзинь» была переименована в АЭС «Ниньтхуан-1», АЭС «Виньхай» — в АЭС «Ниньтхуан-2». АЭС «Ниньтхуан-1» должна была стать первой атомной электростанцией во Вьетнаме (рис. 3).

В проекте АЭС «Ниньтхуан-1» предусмотрены активные и пассивные системы безопасности, которые предотвращают развитие любых аварийных ситуаций. В качестве базового проекта АЭС вьетнамской стороной был выбран российский проект АЭС-2006 нового поколения «3+» с улучшенными показателями [2].

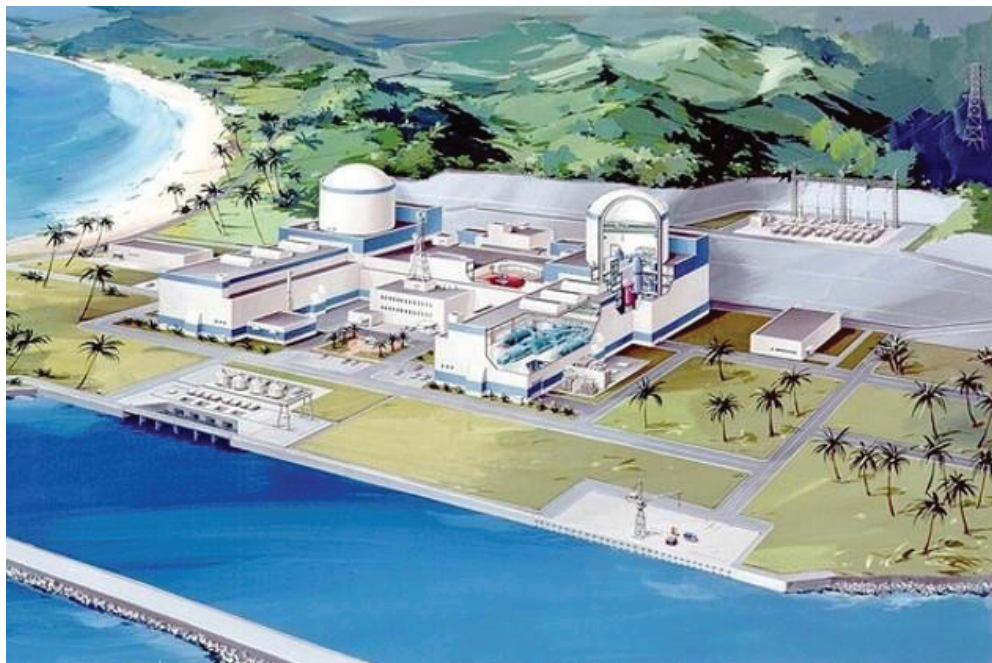


Рис. 3. Проект АЭС «Ниньтхуан-1» во Вьетнаме

Для подготовки специалистов по эксплуатации и обслуживанию АЭС вьетнамские студенты приступили к обучению в университетах России. В Уральском федеральном университете (УрФУ) обучение студентов из Вьетнама по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг» началось в 2014 г. (рис. 4) [3].

а



б



Рис. 4. Группа вьетнамских студентов УрФУ, специальность «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг»: окончание первого курса (*а*); защита дипломных проектов (2020), шестой курс (*б*)

В ноябре 2016 г. Нацсобрание Вьетнама проголосовало за прекращение строительства АЭС по экономическим причинам. Ядерная энергетика сейчас не включена в План электроэнергетики, сроки сооружения АЭС перенесены.

Планы Вьетнама по развитию атомной энергетики остаются неясными. Однако страна может вернуться к вопросу строительства АЭС в будущем.

Список источников

1. Annual report 2018 [Electronic resource]. URL: <https://www.evn.com.vn/userfile/User/tcdl/files/2019/8/EVNAnnualReport2018> (1) (date of access: 08.12.2021).
2. Ташлыков О.Л. Основы ядерной энергетики / науч. ред. С. Е. Щеклеин. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 225 с.
3. Ташлыков О.Л., Климова В.А., Та Ван Т. О проблемах подготовки иностранных специалистов для атомной энергетики стран-партнеров Росатома в УрФУ // Новые образовательные технологии в вузе : сб. ст. XII международ. конф. НОТВ-2015. Екатеринбург : УрФУ, 2015. С. 189–195.

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ АЭС

Т. Д. Торопов¹, А. А. Беляков²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

¹ t_toropov@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрено использование метода моделирования для расчета тепловых схем атомных электростанций (АЭС). Указаны специфические условия, применимые к таким моделям, сложности, возникающие при разработке, и практическая польза законченной модели тепловой схемы.

Ключевые слова: моделирование, АЭС, тепловая схема, тепломеханическое оборудование, исследование

MODELING OF THERMAL SCHEMES OF NUCLEAR POWER PLANTS

T. D. Toropov¹, A. A. Belyakov²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

¹ t_toropov@mail.ru

Abstract. The paper considers the use of the modeling method to calculate of thermal circuits of nuclear power plants. The specific conditions applicable to such models, the difficulties that arise during development, and the practical use of the completed model of the thermal circuit are indicated.

Keywords: modeling, NPP, thermal scheme, mechanical equipment, research

Метод моделирования является одним из известных методов исследования, особенно для тех сфер разработок и проектирования, в которых трудно и дорого создавать макетные и опытные образцы исследуемого объекта. Моделирование является универсальным методом, его можно применять практически к любым объектам исследования, что позволяет создавать модели различных параметров: геометрии, физико-химических и функциональных свойств, и использовать под конкретные задачи [1].

В сфере атомной промышленности и энергетики широко применяется указанный выше метод. Он часто используется в исследовательской и проектной деятельности, в частности для изучения свойств отдельных узлов и конструкций атомных электрических станций (АЭС) [2].

Главным критерием при разработке моделей элементов АЭС является условие безопасности и устойчивости при режимах работы, отличных от номинальных, при его невыполнении модель в дальнейшем не рассматривают. Для моделей тепловых схем АЭС дополнительно рассматривают экономичность и взаимодействие узлов друг с другом для правильного подбора оборудования.

В качестве объекта исследования взята тепловая схема двухконтурной АЭС. На рис. 1 показано положение элементов и узлов друг относительно друга и их соединения между собой сетью трубопроводов.

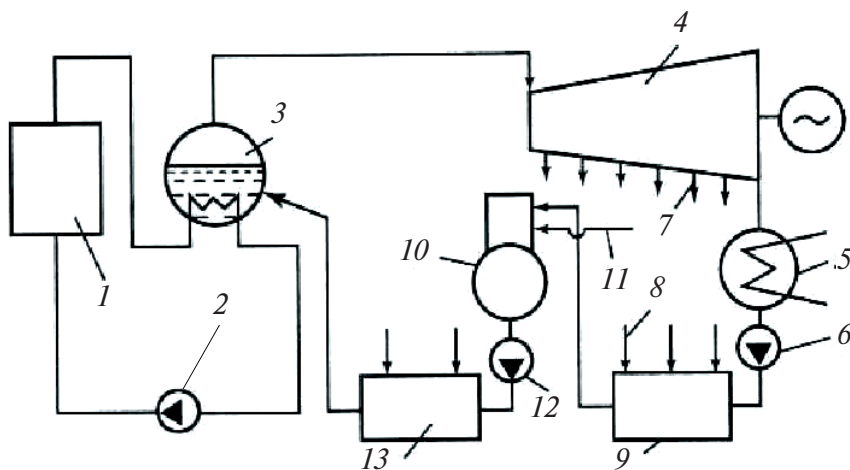


Рис. 1. Тепловая схема двухконтурной АЭС:

- 1 — реактор; 2 — главный циркуляционный насос; 3 — парогенератор;
 4 — паровая турбина; 5 — конденсатор; 6 — конденсатный насос; 7 — отборы пара
 с турбины; 8 — подвод пара на подогреватель; 9 — подогреватели низкого
 давления; 10 — деаэратор; 11 — подвод греющего пара на деаэратор;
 12 — питательный насос; 13 — подогреватели высокого давления

Моделирование заключается в составлении математической модели схемы, на основе которой производится расчет параметров рабочего тела и подбор оборудования каждого узла такой схемы и режимов работы выбранного оборудования. Кроме того, при первичном

построении модели начальные параметры можно задавать по реально существующему оборудованию, а затем изменять их для полного исследования тепловой схемы.

Сложность построения модели состоит в том, что режим работы, например, паровой турбины зависит от режима работы парогенератора, который, в свою очередь, сильно зависит от работы реактора. Аналогичная взаимосвязь узлов существует по всей тепловой схеме, при этом связь устанавливается несколькими параметрами, наличие которых определяется видом оборудования. Например, в деаэраторе этими параметрами являются: давление и расход пара из отбора турбины, начальная температура и давление воды, поступающей из сети подогревателей, вид конструкции деаэратора.

Решение задачи моделирования подразумевает использование современных методов моделирования на основе специальных пакетов программ. Результатом является модель, способная показывать результаты эффективности и безопасности, построенной схемы, отображать альтернативные варианты выбора оборудования для каждого узла.

Следствием использования полученной модели является обоснованный выбор оборудования, возможность заранее оценить условия его работы, а также экономический эффект возможных модернизаций.

Список источников

1. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М. : Энергия, 1978. 416 с.
2. Тепловые схемы ТЭС и АЭС: моделирование и САПР / В. М. Боровков [и др.] ; под ред. С. А. Казарова. СПб. : Энергоатомиздат, 1995. 390 с.

Раздел 5

Чистые угольные технологии.
Газификация. Использование
низкосортных топлив и ТКО

УДК 628.475

О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

Д. С. Беляков¹, С. Н. Коровин², Д. А. Долинин³

^{1,2,3} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

³ tevp@tvp.ispu.ru

Аннотация. В работе представлено исследование зависимости физико-механических свойств керамического материала, полученного с добавлением углеродистого остатка пиролиза твердых коммунальных отходов (ТКО), от температуры обжига изделий. Результаты исследований позволяют получать керамические изделия с требуемыми свойствами при снижении расхода энергоресурсов.

Ключевые слова: модифицированная керамика, обжиг, физико-механические свойства, водопоглощение, пиролиз

ON THE INFLUENCE OF THE FIRING TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF THE MODIFIED CERAMICS

D. S. Belyakov¹, S. N. Korovin², D. A. Dolinin³

^{1,2,3} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

³ tevp@tvp.ispu.ru

Abstract. The paper presents a study of the dependence of the physical and mechanical properties of a ceramic material obtained with the addition of the carbonaceous residue of MSW pyrolysis on the firing temperature of the products. The research results make it possible to obtain ceramic products with the required properties while reducing energy consumption.

Keywords: modified ceramics, firing, physical and mechanical properties, water absorption, pyrolysis

Твердые продукты пиролиза коммунальных отходов содержат органические и неорганические компоненты. Одним из направле-

ний их использования является производство различных строительных материалов. Предложено использовать твердый углеродистый остаток пиролиза смеси твердых коммунальных отходов (ТКО) среднего морфологического состава в технологии производства керамического материала в качестве структурофазообразующей добавки [1]. Сырьевым материалом для модифицированной керамики является глина местных месторождений.

Как правило, керамика обжигается в шкафных или туннельных печах, и для ее обжига необходимо значительное количество тепловой энергии [2]. Актуальной представляется задача определения зависимости свойств керамического материала от температуры обжига. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение физико-механических свойств (механической прочности и водопоглощения) керамического материала, полученного с использованием пиролизного остатка ТКО.

Экспериментальные исследования механической прочности материала проведены при помощи гидравлического пресса. Было выполнено по три опыта на цилиндрических образцах, отличающихся температурой обжига. Результаты приведены на рис. 1.

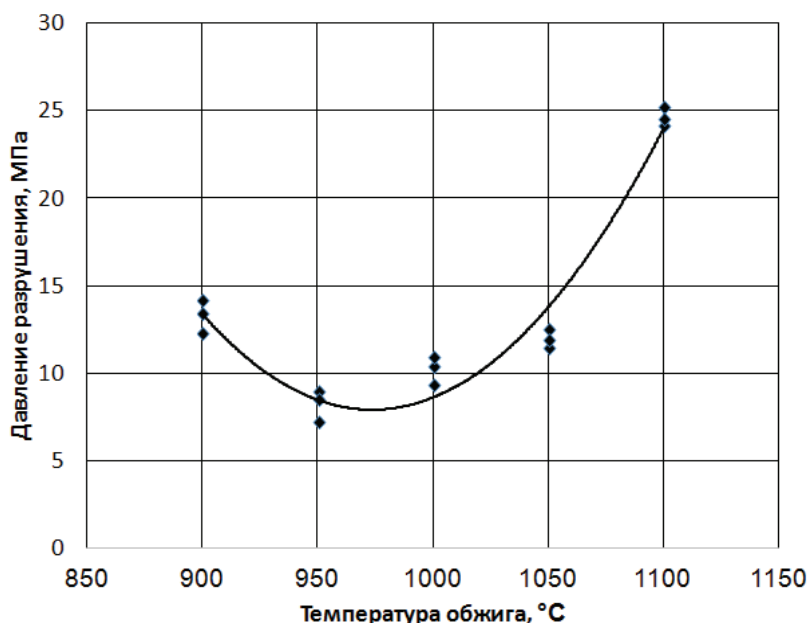


Рис. 1. Прочность керамики в зависимости от температуры обжига

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида

$$p = 960,04 - 1,9557t + 0,001t^2$$

с достоверностью 0,95.

Таким образом, получили керамику марки М100 для температур обжига 950, 1000, 1050 °С; М125 для 900 °С; М250 для 1100 °С.

Водопоглощение определяли в соответствии с ГОСТ 7025–91 путем выдерживания предварительно высушенных и взвешенных образцов в воде в течение 48 часов и последующим взвешиванием насыщенных водой образцов. Величина массового водопоглощения определена по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100 \%,$$

где m_1 — масса насыщенного водой образца, кг; m — масса образца, высушенного до постоянной массы, кг.

Результаты экспериментов, характеризующие зависимость массового водопоглощения от температуры обжига керамики представлены на рис. 2.

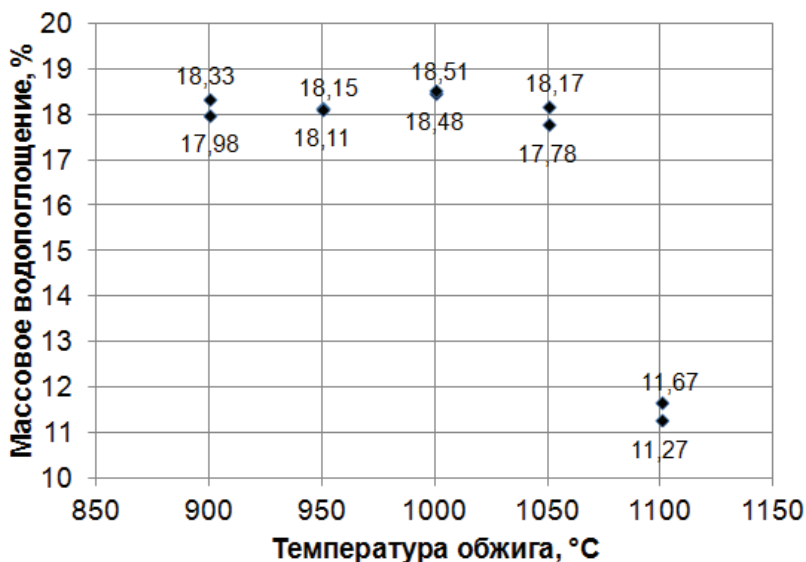


Рис. 2. Массовое водопоглощение керамики в зависимости от температуры обжига

Из результатов анализа данных, представленных на рис. 2, видно, что водопоглощение не зависит от температуры обжига в диапазоне 900...1050 °С и составляет в среднем 18,2 %. При увеличении температуры обжига до 1100 °С водопоглощение снижается до 11,5 %. Для сравнения: водопоглощение керамического кирпича в соответствии с ГОСТ 530–2012 составляет 6...14 %.

Получены температурные зависимости водопоглощения и механической прочности керамического материала в диапазоне 900...1100 °С.

Таким образом, можно сделать вывод, что целесообразно использовать пиролизный остаток твердых коммунальных отходов в технологии получения новых керамических изделий вместо дорогостоящих добавок.

Список источников

1. Исследование физических свойств керамического материала, полученного с использованием твердого остатка пиролиза коммунальных отходов / О. Б. Колибаба [и др.] // Энергосбережение — теория и практика : тр. Десятой Международ. школы-семинара молодых ученых и специалистов. Курск : Университетская книга, 2020. 435 с.

2. Шевченко В. Я. Введение в техническую керамику. М. : Наука, 1993. 112 с.

УДК 502/504

МУСОРΟΣЖИГАНИЕ КАК АЛТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А. В. Верещагина¹, О. Н. Яковлева², Н. А. Третьякова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ const.99@mail.ru

Аннотация. В работе представлен альтернативный способ утилизации твердых коммунальных отходов — мусоросжигание. Приведен список объектов размещения твердых коммунальных отходов в Свердловской области.

Ключевые слова: альтернативный способ, утилизация твердых коммунальных отходов, мусоросжигание, твердые коммунальные отходы, объект размещения твердых коммунальных отходов

WASTE INCINERATION AS AN ALTERNATIVE WAY OF MSW RECYCLING

A. V. Vereshchagina¹, O. N. Yakovleva², N. A. Tretyakova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ const.99@mail.ru

Abstract. The paper presents an alternative way to utilize solid municipal waste — incineration. The list of objects for the placement of solid municipal waste in the Sverdlovsk region is presented.

Keywords: alternative method, solid municipal waste disposal, waste incineration, municipal solid waste, solid municipal waste disposal facility

Под термином «полигон твердых коммунальных отходов» (ТКО) понимается комплекс природоохранных сооружений, который предназначен для складирования, изоляции и обезвреживания ТКО, обеспечивающий защиту экосистемы от загрязняющих веществ и болезнетворных микроорганизмов [1].

В Свердловской области на 2020 г. эксплуатируется 13 полигонов ТКО, их перечень представлен в таблице [2]. У большинства полигонов подходит к концу срок эксплуатации, ввод новых площадей под полигоны затруднен, поэтому необходима разработка альтернативных способов утилизации отходов.

Таблица

Объекты размещения отходов на территории Свердловской области

Наименование объекта размещения ТКО	Ближайший населенный пункт к объекту обращения с ТКО	Муниципальное образование, в котором расположены источники образования ТКО
Полигон твердых бытовых отходов «Северный» п. Крутой	Поселок Крутой Городской округ Верхняя Пышма	Город Екатеринбург Березовский городской округ Городской округ Среднеуральск Городской округ Верхняя Пышма Арамилский городской округ Сысертский городской округ
Полигон твердых бытовых отходов п. Белоярский	Поселок Белоярский	Поселок Уральский Белоярский городской округ Городской округ Верхнее Дуброво
Полигон твердых бытовых отходов г. Сысерть	Город Сысерть	Сысертский городской округ
Полигон твердых бытовых отходов п. Двуреченск	Поселок Двуреченск	Сысертский городской округ Арамилский городской округ
Полигон твердых бытовых и промышленных отходов г. Асбест	Город Асбест	Асбестовский городской округ Малышевский городской округ
Полигон твердых бытовых отходов г. Сухой Лог	Город Сухой Лог	Городской округ Сухой Лог Городской округ Богданович
Полигон твердых бытовых отходов п. Рефтинский	Поселок городского типа Рефтинский	Городской округ Рефтинский
Полигон твердых бытовых отходов г. Каменск-Уральский	Город Каменск-Уральский	Город Каменск-Уральский Каменский городской округ
Полигон твердых бытовых отходов г. Реж	Город Реж	Режевской городской округ

Окончание табл.

Наименование объекта размещения ТКО	Ближайший населенный пункт к объекту обращения с ТКО	Муниципальное образование, в котором расположены источники образования ТКО
Свалка промышленно-бытовых отходов п. Буланаш	Поселок Буланаш	Артемовский городской округ
Свалка твердых бытовых отходов г. Тавда	Город Тавда	Слободо-Туринский муниципальный район Туринский городской округ Таборинский муниципальный район Тавдинский городской округ
Свалка промышленно-бытовых отходов д. Фадюшина	Деревня Фадюшина	Талицкий городской округ Камышловский муниципальный район Камышловский городской округ Пыминский городской округ Тугулымский городской округ Байкаловский муниципальный район Ирбитское муниципальное образование Город Ирбит Байкаловский муниципальный район
Полигон твердых бытовых отходов г. Заречный	Город Заречный	Городской округ Заречный

В настоящее время наилучшим способом обезвреживания ТКО является мусоросжигание. Цель мусоросжигания — обезвреживание ТКО для предотвращения образования новых свалок бытовых отходов. Кроме того, такой способ переработки позволяет не допускать негативного воздействия на окружающую среду вторичных продуктов обезвреживания отходов. Сжигание коммунальных отходов производится в топочных устройствах специальных котлоагрегатов, конструкция которых учитывает специфические свойства мусора: высокую влажность (до 60 %), широкое разнообразие компонентов, включая черные, цветные и тяжелые металлы, строительный материал, битое стекло, пластмассу, вязкие и гниющие вещества и др. [3]. Схема установки показана на рис. 1 [3].

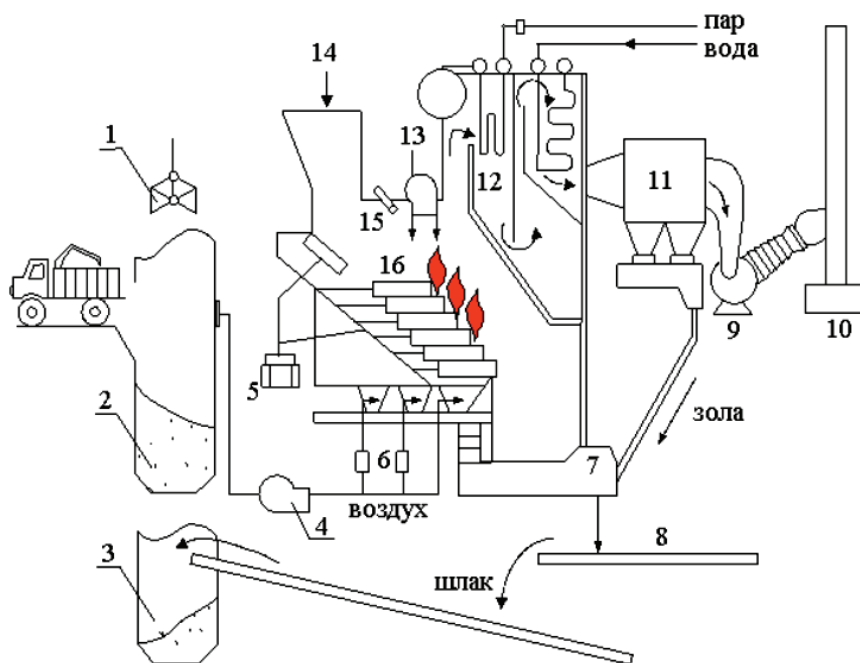


Рис. 1. Технологическая схема переработки отходов на мусоросжигательных заводах:

- 1 — мостовой грейферный кран; 2 и 3 — мусорный и шлаковый отсеки бункера-накопителя; 4 — вентилятор первичного дутьевого воздуха; 5 — станция гидропривода; 6 — паровые калориферы-воздухоподогреватели; 7 — шлакоизвлекатель; 8 — ленточные транспортеры для удаления шлака и золы; 9 — дымосос; 10 — дымовая труба; 11 — электростатический фильтр; 12 — котел-утилизатор; 13 — вентилятор вторичного воздуха; 14 — загрузочный бункер; 15 — растопочная горелка; 16 — колосниковая решетка

Оставшиеся после сжигания ТКО шлаки, зола используются для изготовления по специально разработанному технологическому процессу облицовочной стеклоплитки и гранулированного шлака, идущего затем для приготовления керамзита или других строительных материалов.

Металлы, которые находятся в составе шлака и золы, выпускаются в жидком состоянии в специальные формы для образования слитков, которые сдаются по определенной цене предприятиям по переработке вторичных металлов.

Сжигание ТКО происходит при температуре ≥ 850 °С, необходимых для минимального образования вредных веществ, концентрация

которых в приземном слое значительно меньше предельно допустимых концентраций.

При мусоросжигании, в котором ТКО не только полностью обезвреживаются, но и являются возобновляемым и неисчерпаемым топливом, получаемые тепло, электроэнергия, металлы, облицовочная плитка, гранулированный шлак являются продуктами утилизации твердых бытовых отходов. Таким образом, процесс мусоросжигания как способ обезвреживания бытового мусора является безотходным, исключая загрязнение окружающей среды вторичными продуктами, т. к. выбросы вредных веществ, образуемые при мусоросжигании, ничтожно малы и не причиняют никакого вреда живой природе.

Список источников

1. Инструкция по проектированию и эксплуатации полигонов для твердых бытовых отходов [Электронный ресурс] : утв. М-вом стр-ва РФ 02.11.1996. URL: <https://legalacts.ru/doc/instruktsija-po-proektirovaniu-ekspluatatsii-i-rekultivatsii-poligonov/> (дата обращения: 03.12.2020).

2. Объекты обработки и размещения [Электронный ресурс] // ЕМУП «Спецавтобаза». URL: <https://sab-ekb.ru/regionalnyiy-operator/proekt-jekologija/obekty-obrabotki-i-razmeshhenija/> (дата обращения: 03.12.2020).

3. Левин Б. И., Бутко А. А. Использование отходов в качестве топлива путем экологически чистого обезвреживания с выработкой энергии (применительно к городскому хозяйству Москвы). М. : Прима-Пресс, 2005. 128 с.

УДК 621.1:662

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

М. И. Ершов¹, М. А. Горский², В. Г. Тупоногов³, Н. А. Абаймов⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ershov1807@gmail.com

Аннотация. В работе изложены результаты расчетов псевдоожигенного слоя в эйлеровой постановке на трехмерных неструктурированных сетках из полиэдрических элементов с различным уровнем подробности и на одной двумерной структурированной гексаэдрической сетке с уровнем подробности, сопоставимым с самой подробной трехмерной сеткой. Представлены график давления для центральной точки слоя и параметры, связанные с зарождением и выходом пузырей. Выявлена разница между 2D- и 3D-моделированием слоя.

Ключевые слова: псевдоожигенный слой, модель EMMS, сеточная независимость, эйлерова постановка

INVESTIGATION OF MESH INDEPENDENCE WHEN MODELING FLUIDIZED BED

M. I. Ershov¹, M. A. Gorsky², V. G. Tuponogov³, N. A. Abaimov⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ershov1807@gmail.com

Abstract. The study contains the results of calculations of a fluidized bed in the Euler formulation on 3D-unstructured meshes of polyhedral elements with different cell sizes and one 2D-structured hexahedral mesh with the cell size comparable to the most detailed 3D-mesh. Pressure plot for central point of the layer and parameters related to the birth and passage of bubbles are presented. The difference between 2D- and 3D-fluidized bed modeling was revealed.

Keywords: fluidized bed, EMMS model, mesh independence, Euler formulation

В ходе решения была воссоздана модель экспериментальной установки Дж. Дэвидсона и К. Бойса [1]. Установка представляет собой цилиндр диаметром 0,05 м и высотой 0,7 м (рис. 1, а). Под днище подавался воздух с постоянной плотностью $1,225 \text{ кг/м}^3$ со скоростью в сечении днища 0,563 м/с. В моделировании на основе сплошных сред использовались сферические частицы с диаметром 1,2 мм. Плотность частиц — 960 кг/м^3 . Высота слоя до начала псевдоожижения 156 мм.

При моделировании использовалась модель аэродинамического сопротивления EMMS, встроенная в Ansys Fluent 2020 R2 [2]. Поток моделировался ламинарным, на стенках для обеих фаз было задано условие непротекания (No Slip).

Сопряжение скоростей и давления потока осуществлялось по схеме SIMPLE. Градиент дискретизируется с помощью схемы Least Squares Cell Based, давление — с помощью схемы PRESTO, а импульс, объемная доля и нестационарное слагаемое дискретизируются с помощью схемы First Order. Временной шаг составляет 0,001 с, коэффициенты нижней релаксации брались по умолчанию. Моделировалось 1,5 с потока. Наиболее подробные сетки 2D и 3D, а также порозность слоя (объемная доля воздуха) в конце моделирования представлены на рис. 1, б–г.

В расчете использовалось пять различных сеток, четыре из которых — 3D (Fluent Meshing), одна — 2D из Ansys Meshing (таблица). Для сравнения расчета на различных сетках использовались параметры динамики пузырей, приведенные в таблице. Последние три строки обозначают количество пропущенных пузырей через соответствующие точки. Высота нижней точки — 6,75 мм, средней — 83,25 мм, верхней — 159,75 мм [1].

Из таблицы видно, что для 3D-случаев сеточная независимость достигается при размере ячейки 1,0–1,2 мм. Стоит заметить, что независимо от подробности сетки количество образованных пузырей на входе неизменно. Случай 2D, несмотря на те же размеры ячеек, что у самого подробного случая в 3D, отличается от последнего по количеству зарождающихся и прошедших по центру пузырей.

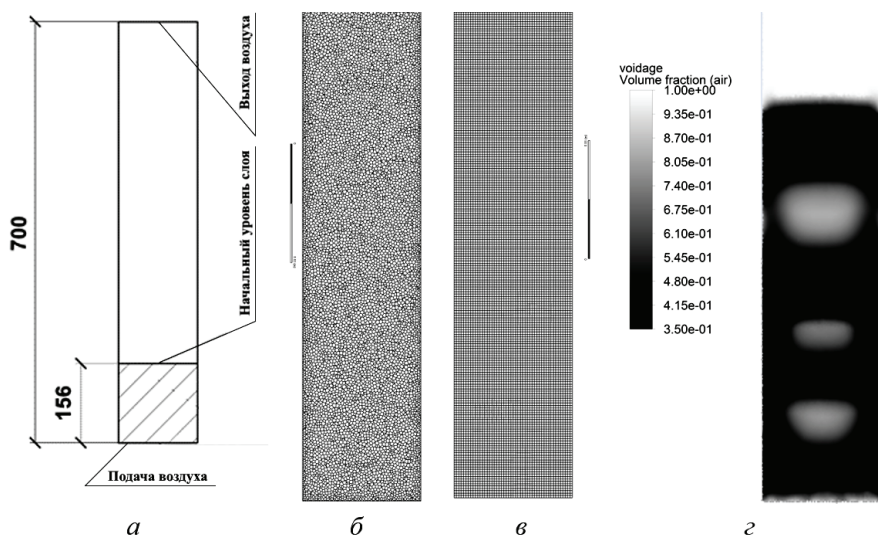


Рис. 1. Центральное сечение модели:

a — схема установки; *б* — полиэдрическая сетка (3D), 1 млн ячеек;
в — гексаэдрическая сетка (2D); *г* — порозность в момент времени 1,5 с

Таблица

Данные о динамике пузырей для различных сеток

№ случая	1	2	3	4	5
Размер ячейки, мм	3,5–4,5	2,0–2,5	1,3–1,6	1,0–1,2	1,0
Размерность	3D	3D	3D	3D	2D
Число ячеек	36000	158000	500000	1000000	35000
Min качество по ортогональности	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0
Время расчета (64 ядра)	2,5 ч	10 ч	1,5 дня	3 дня	2 ч
Время зарождения первого пузыря, с	0,08	0,075	0,065	0,065	0,065
Пузыри (низ), шт.	9	9	9	9	8
Пузыри (середина), шт.	7	6	6	6	4
Пузыри (верх), шт.	5	4	3	3	3

Нагляднее сеточная независимость показана на рис. 2, на котором изображены пульсации давления (Static Pressure) в средней точке (вы-

сота 83,25 мм). Видно, что при увеличении детализации сетки график приближается к наиболее подробному случаю 4. Результаты на двумерной сетке (случай 5) подобны эталонному случаю 4 лишь на отрезке времени до одной секунды. Далее при развитии псевдооживления отмечается сдвиг колебаний по фазе.

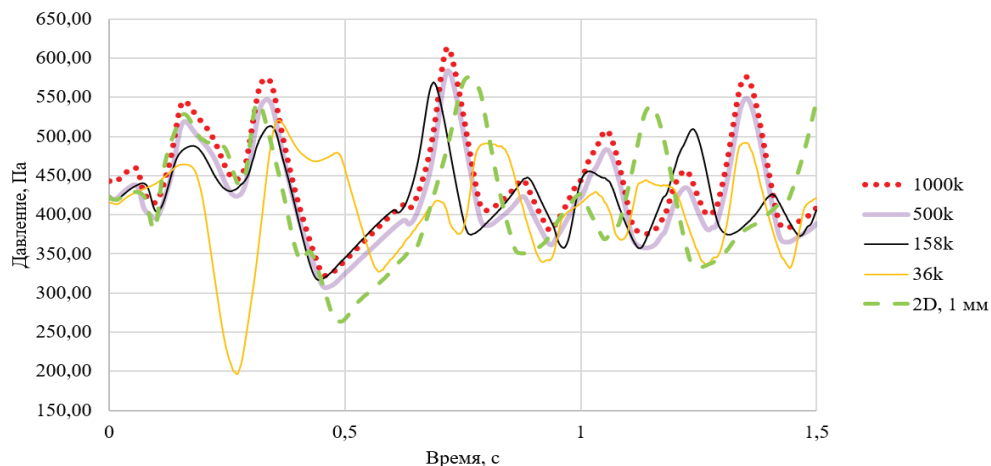


Рис. 2. Колебания давления в центральной точке слоя

Отличие результатов в 2D и 3D исследователи объясняют несколькими факторами: во-первых, в трехмерном слое лучше учитываются силы и напряжения из-за учета большего количества частиц и пространства [3]; во-вторых, в двумерном слое нельзя точно смоделировать влияние всех стенок [4]. Тем не менее, многие исследователи используют 2D-постановку для проведения качественного анализа влияния различных конструкций и условий из-за высокой скорости расчетов [3; 4].

Список источников

1. The origin of pressure oscillations in slugging fluidized beds: Comparison of experimental results from magnetic resonance imaging with a discrete element model [Electronic resource] / C. M. Boyce [et al.] // Chemical Engineering Science. 2014. Vol. 116. P. 611–622. DOI: 10.1016/j.ces.2014.05.041 (date of access: 26.11.2020).
2. CAE-система ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 26.11.2020).

3. Gujjula R. K. Hydrodynamic study of gas-solid flow in an internally circulating fluidized bed (ICFB) using experimental and CFD techniques: PhD Thesis. Indian Institute of Technology Hyderabad, 2014. 216 p.
4. Shi H., Komrakova A., Nikrityuk P. Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments [Electronic resource] // Powder Technology. 2019. Vol. 343. P. 479–494. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.043 (date of access: 26.112020).

УДК 544.431.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ

**У. В. Жижина¹, Я. О. Морозов², Ю. А. Каграманов³,
С. А. Грицук⁴, В. Г. Тупоногов⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ uly-zhh@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе был применен новый метод оценки концентраций оксидов азота при горении синтез газа в камере сгорания газовой турбины, который позволил связать полный детальный механизм массива параллельных реакций Grimech 3.0 с уравнениями компьютерной гидродинамики. Проведены верификационные расчеты на модельной камере сгорания газовой турбины в интервале значений коэффициента избытка топлива 0,5–2. Новая методика была применена при определении выбросов оксида азота и максимальной температуры стенки пламенной трубы промышленной камеры сгорания.

Ключевые слова: синтез-газ, газовая турбина, оксиды азота, ANSYS

SIMULATION OF NITROGEN OXIDE FORMATION DURING SYNGAS GAS TURBINE OPERATION

**U. V. Zhizhina¹, I. O. Morozov², Y. A. Kagramanov³,
S. A. Gritsuk⁴, V. G. Tuponogov⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ uly-zhh@mail.ru

Abstract. In this paper, we applied a new method for estimating the concentrations of nitrogen oxides during combustion of synthesis gas in the combustion chamber of a gas turbine. it allowed us to link the complete detailed mechanism of the Grimech 3.0 parallel reaction array with the equations of computer hydrodynam-

ics. Verification calculations were carried out on a model combustion chamber of a gas turbine in the range of values of the fuel excess factor of 0,5–2. The new method was used to determine nitrogen oxide emissions and the maximum temperature of the flame tube wall of an industrial combustion chamber.

Keywords: synthesis gas, gas turbine, nitrogen oxides, ANSYS

Введение. Технологии парогазовых циклов с внутрицикловой газификацией твердого топлива, по мнению многих специалистов [1; 2], могут составить конкуренцию традиционным системам генерации электроэнергии; в последнее время такие технологии активно развиваются. Одной из проблем при проектировании газовой турбины, входящей в состав парогазовой установки (ПГУ) является оценка выбросов оксидов азота. В настоящее время не существует единой методики расчета выбросов, ввиду сложности процесса образования оксидов. В рассматриваемом процессе могут реализовываться 11 реакций образования оксидов азота [3]. Для реакций в таблице приведены параметры уравнения Аррениуса: предэкспоненциальный множитель — k_0 , энергии активации — E .

Таблица

Ключевые реакции процесса образования оксидов азота [3]

Реакция	k_0 , моль/(см ³ · с)	E , Дж/моль	Источник
$O + N_2 = NO + N$	$4,5487e + 10$	35991,4	Bose, 1996
$N + O_2 = NO + O$	$6e + 9$	6300,0	Waldman, 1974
$N + OH = NO + H$	$6e + 11$	8000,0	
$N_2O + O = 2NO$	$1e + 14$	28000,0	
$N_2O + H = NH + NO$	$3,87e + 14$	18880,0	Gri 3.0
$N_2O + CO = NCO + NO$	$1,9e + 17$	740,0	
$NO_2 + OH = HO_2 + NO$	$2,11e + 12$	–480,0	
$NO_2 + M = O + M + NO$	$1e + 20$	0,0	
$NO_2 + O = O_2 + NO$	$3,9e + 12$	–240,0	
$NO_2 + H = OH + NO$	$1,32e + 14$	360,0	
$NO_2 + CN = NCO + NO$	$1e - 10$	–171,0	Park, 1993

В настоящей работе разработана новая методика расчета процессов образования оксидов азота в камере сгорания газовой турбины, работающей на угольном синтез-газе. Расчеты выполнены в программных

пакетах компании CHEMKIN, Energico и Reaction Design, недавно появившихся в составе ANSYS.

Постановка задачи и методика расчета. Объемная модель камеры была выстроена в соответствии с известными чертежами изделия [4]. Благодаря функции ANSYSFluent объединения тетраэдральных элементов в более крупные полиэдрические (рис. 1), количество элементов расчетной области было снижено с 900 тыс. до 492 тыс., что сказалось на скорости расчета.

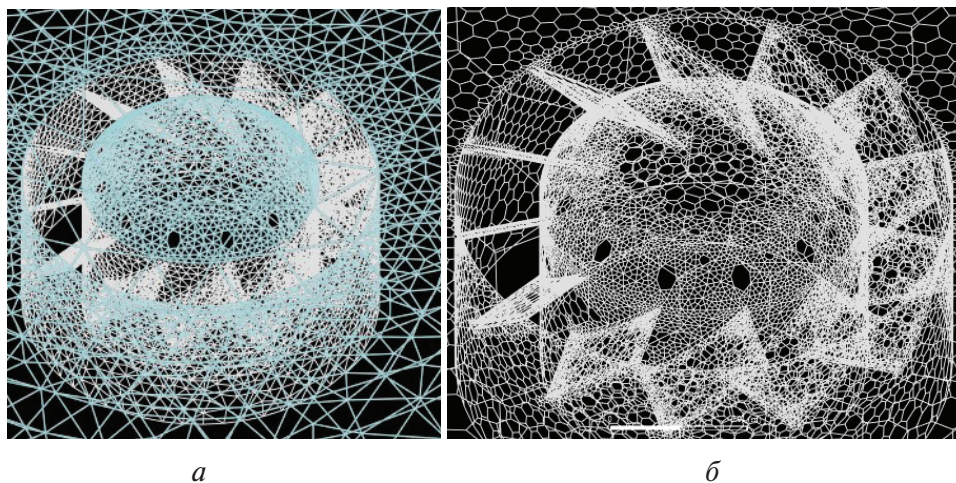


Рис. 1. Преобразование тетраэдральной (а) сетки в полиэдрическую (б)

Были проведены расчеты при коэффициентах избытка топлива φ , равных 0,5; 1; 1,5; 2. Температура продуктов сгорания на выходе из камеры равнялась 1450 °С. Расход топлива составлял 0,01 кг/с. Состав топлива: $\text{H}_2 : \text{CO} : \text{H}_2\text{O} : \text{CO}_2 : \text{N}_2 = 0,26 : 0,56 : 0,06 : 0,03 : 0,09$ («модельный синтез-газ» кислородной газификации угля [5]).

Результаты. Расчеты показали отличие от экспериментальных данных [4] на 2,5–10 % (рис. 2). Максимальное расхождение результатов CHEMKIN и опытных данных при коэффициенте избытка топлива $\varphi = 1$ уменьшилось на 20 % по сравнению с расчетными данными CFX [5].

Были выполнены расчеты выбросов оксидов азота и монооксида углерода в камере сгорания турбины ГТ-100–750 КСВД. В качестве топливного газа были использованы угольные синтез-газы различного состава и типа газификации, а также природный газ.

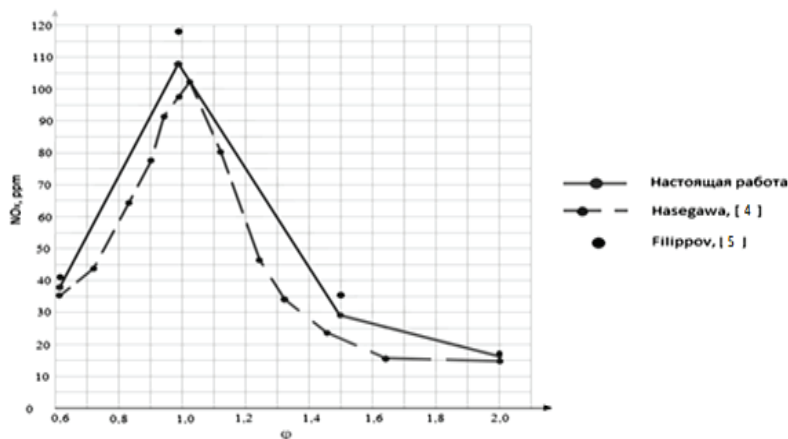


Рис. 2. Сравнение методик оценки выбросов азота

Наилучшие результаты по выбросам оксидов азота показал состав газа GE. Самыми проблемными газами являются синтез-газы Polk Power и Техасо (кислородный процесс). Близкими к GE являются синтез-газы, полученные в ходе KRW и Техасо воздушной газификации. Выбросы монооксида углерода оказались максимальными при сжигании природного газа, минимальными при сжигании синтез-газа Техасо (воздушный процесс).

Несмотря на значительную разницу значений низшей теплоты сгорания природного газа и синтез-газов, расчетные максимальные температуры стенок имеют близкие значения. Это связано с неравномерностью распределения поля температур по длине камеры.

Варьирование температуры топлива слабо влияет на выбросы оксидов азота и монооксида углерода, при этом наблюдается нелинейная зависимость изменения максимальной температуры стенки, которая достигается при температуре топлива, близкой к 500 °С.

С увеличением температуры воздушного дутья монотонно возрастает максимальная температура стенок, а выбросы оксидов азота и монооксида углерода сокращаются на полпорядка.

Заключение. В работе была протестирована новая методика расчета параллельных гомогенных реакций образования оксидов азота в камере сгорания газовой турбины при совместном применении ANSYS Fluent и CHEMKIN-Pro. Результаты расчетов показали, что при неизменной скорости расчета точность возросла на 20 % по сравнению с расчетами в CFX.

Список источников

1. Giuffrida A., Romano M. C., Lozza, G. Thermodynamic Analysis of Air-Blown Gasification for IGCC Applications // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. P. 3949–3958.
2. Ryzhkov A. Technological solutions for an advanced IGCC plant [Electronic resource] // *Fuel*. 2018. Vol. 214. P. 63–72. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.099 (date of access: 11.11.2020).
3. Eun-Seong Cho. Numerical Evaluation of NO_x Mechanisms in Methane-Air Counter Flow Premixed Flames [Electronic resource] // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. Vol. 23, № 3. P. 659–666. DOI: 10.1007/s12206-008-1222-y (date of access: 11.11.2020).
4. Hasegawa T. Gas Turbine Combustion Technology Reducing Both Fuel-NO_x and Thermal-NO_x Emissions for Oxygen-Blown IGCC With-Hot/Dry Synthetic Gas Cleanup [Electronic resource] // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. Vol. 129, № 2. P. 358–369. DOI: 10.1115/1.2432896 (date of access: 11.11.2020).
5. Filippov P., Khudyakov P., Ryzhkov A. F. Validation of the thermal NO_x emissions model from a gas fuel combustor under atmospheric pressure [Electronic resource] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899, № 9. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/899/9/092005 (date of access: 11.11.2020).

УДК 662.613.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА РЕАКЦИЮ КАРБЕНИЗАЦИИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ

А. В. Замятина¹, А. Д. Никитин², П. В. Осипов³, Т. Ф. Богатова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ zanya97@yandex.ru

Аннотация. Изучено влияние добавки водяного пара на скорость карбенизации оксида кальция в температурном диапазоне до 1000 °С методом термogrавиметрического анализа (ТГА). Проведена серия экспериментов с нагревом образцов оксида кальция с различными скоростями и вариациями концентраций водяного пара и диоксида углерода. Наличие водяного пара в 3–4 раза ускоряет реакцию карбенизации CaO.

Ключевые слова: оксид кальция, карбенизация, диоксид углерода, ТГА

A STUDY OF THE INFLUENCE OF WATER VAPOR ON THE CALCIUM OXIDE CARBONIZATION REACTION

A. V. Zamyatina¹, A. D. Nikitin², P. V. Osipov³, T. F. Bogatova⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ zanya97@yandex.ru

Abstract. The influence of water vapor addition on the calcium oxide carbonization rate in the temperature range up to 1000 °C was studied by thermogravimetric analysis. A series of experiments with calcium oxide samples at different heating-rates and variations in the concentration of water vapor and carbon dioxide was carried out. The presence of water vapor speeds up the CaO carbonation reaction 3–4 times.

Keywords: calcium oxide, carbonization, carbon dioxide, TGA

Глобальная декарбенизация мировой энергетики требует разработки и реализации новых подходов к формированию энергоге-

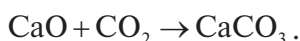
нерации с пониженными выбросами CO_2 . Одним из таких способов является использование природных твердых отходов энергетики для минерализации техногенных выбросов CO_2 [1].

При разработке указанных технологий карбонизации и минерализации необходимо учитывать карбонатную активность золошлаковых отходов, которая оценивается по стехиометрической формуле Стенуара и соответствует максимально возможной улавливающей способности золы:

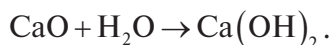
$$\text{CO}_2 (\%) = 0,785(\text{CaO} \% - 0,7\text{SO}_3 \% + 1,09\text{MgO} \% + 0,71\text{Na}_2\text{O} \% + 0,468\text{K}_2\text{O} \% .$$

Предполагается, что весь CaO (кроме связанного в CaSO_4) и прочие оксиды будут реагировать с образованием соответствующих карбонатов.

Реакция карбонизации оксида кальция описывается уравнением:



При наличии воды либо водяного пара параллельно с карбонизацией оксида кальция происходит реакция гидратации:



Указанные реакции обратимы. При атмосферном давлении интенсивное разложение карбоната кальция происходит при температуре выше 900°C , гидроксида кальция — при температуре выше 500°C .

Ранее исследована карбонизация летучей золы каменного угля в кипящем слое в диапазоне температур $30\text{--}60^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении [2]. За счет увлажнения потока газа получена достаточно высокая скорость поглощения CO_2 .

Целью настоящей работы является исследование влияния добавки водяного пара на скорость карбонизации оксида кальция в температурном диапазоне до 1000°C .

Исследования проведены методом термogrавиметрического анализа на приборе NETZSCH STA 449F3, совмещенном с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aëolos для анализа состава газа. В качестве материала для анализа использован чистый оксид кальция по ГОСТ 8677–76. Навеска массой около 30 мг нагревалась с заданной скоростью нагрева (2,5; 5 и 20 К/мин) от комнатной температуры до 1000°C при непрерывной продувке смесью $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ с заданным содержанием компонентов. Расход смеси составлял 8 л/ч. Варьиро-

валось содержание CO_2 в смеси: 100, 75, 50, 25 и 15 % (об.). До начала подачи пара установка предварительно разогревалась до 170 °С, осуществлялась изотермическая выдержка 10 мин и далее шел разогрев со скоростью 20 К/мин до 1000 °С.

На рис. 1 видно, что в эксперименте 1 со скоростью нагрева 20 К/мин масса навески возросла на 50 %. При взаимодействии с CO_2 образуется наибольшее давление среды, что само способствует лучшим условиям к взаимодействию со щелочным оксидом CaO [3].

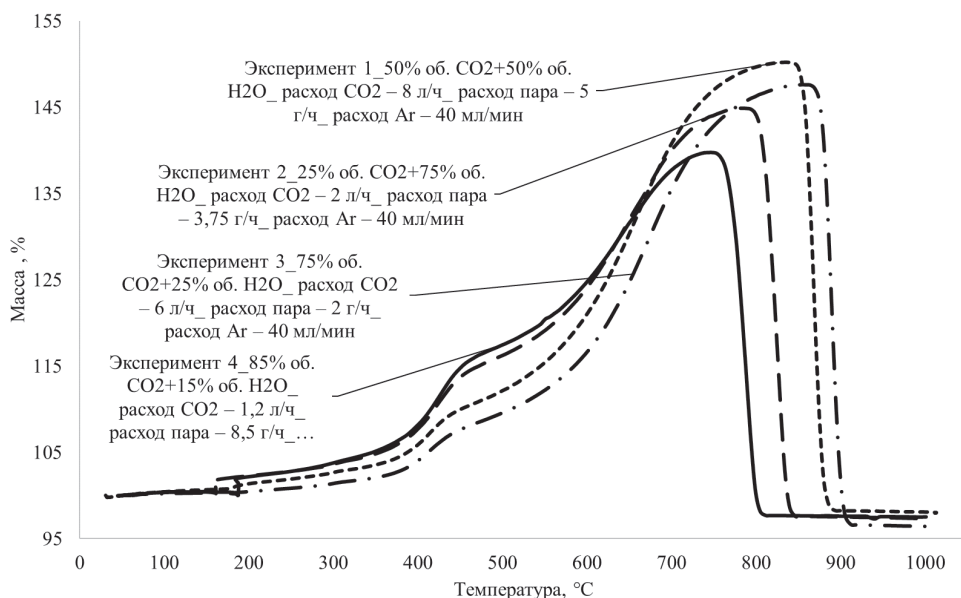


Рис. 1. Данные термического анализа при взаимодействии CaO с CO_2 и H_2O

Высокая скорость нагрева выбрана для максимизации термодинамического неравновесия при проведении эксперимента. Дополнительно проведена серия экспериментов с уменьшением скорости нагрева при карбонизации CaO в чистом CO_2 для оценки скорости реакции при уменьшении термодинамического неравновесия с массой навески 20–30 мг (рис. 2). Максимальное увеличение массы получено при скорости нагрева 2,5 К/мин., следовательно, наименьшая скорость нагрева обеспечивает большее количество реагирования CaO с CO_2 [3].

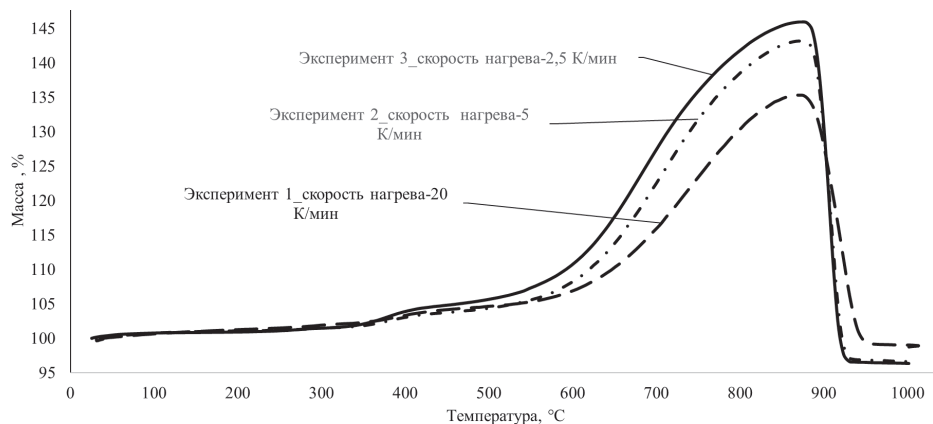


Рис. 2. Сравнение параметров карбонизации образца CaO при различных скоростях нагрева в среде CO₂

По результатам экспериментов видно, что наличие водяного пара значительно (в 3–4 раза) ускоряет реакцию карбонизации CaO. Температура начала разложения CaCO₃ с уменьшением концентрации CO₂ в газе снижается, что соответствует термодинамическому равновесию реакции. На кривых термогравиметрии выделяются участки с увеличенной скоростью роста массы навески в температурном диапазоне от 400 до 500 °C, в котором происходит разложение Ca(OH)₂, т. е. разложение Ca(OH)₂ способствует образованию CaCO₃. При варьировании скорости нагрева полной карбонизации навески (что соответствует увеличению массы навески на 78 %) не достигнуто.

Список источников

1. Юлкин М. А. Глобальная декарбонизация и ее влияние на экономику России [Электронный ресурс]. URL: http://downloads.igce.ru/news/Yulkin_M_A_ext_abstract_IGCE_06022019.pdf (дата обращения: 12.11.2020).
2. Simultaneous capture and mineralization of coal combustion flue gas carbon dioxide (CO₂) [Electronic resource] / K. J. Reddy [et al.] // Energy Procedia. 2011. Vol. 4. P. 1574–1583. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.027 (date of access: 12.11.2020).
3. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration [Electronic resource] // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112, p. 5. P. 4173–4182. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.145 (date of access 12.11.2020).

УДК 628.475

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

В. В. Крайнов¹, К. В. Суманева², Д. А. Долинин³

^{1,2,3} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

³ tevp@tvp.ispu.ru

Аннотация. В работе представлено исследование теплофизических свойств керамического материала, полученного с добавлением углеродистого остатка пиролиза текстильных отходов.

Ключевые слова: текстильные отходы, пиролиз, модифицированная керамика, теплофизические свойства

USE OF TEXTILE WASTE IN THE PRODUCTION OF MODIFIED CERAMICS

V. V. Kraynov¹, K. V. Sumaneeva², D. A. Dolinin³

^{1,2,3} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

³ tevp@tvp.ispu.ru

Abstract. The paper presents a study of the thermophysical properties of a ceramic material obtained with the addition of a carbonaceous residue from the pyrolysis of textile waste.

Keywords: textile waste, pyrolysis, modified ceramics, thermophysical properties

За последние 60 лет количество текстильных отходов в мире выросло на 811 % и составляет в настоящее время более 16 млн т ежегодно. Большая часть этих отходов отправляется на свалки и загрязняет экосистемы.

Предложено использовать твердый углеродистый остаток пиролиза текстильных отходов в технологии производства керамического материала в качестве структурофазообразующей добавки. Сырьем для модифицированной керамики является глина местных месторождений.

Исследование особенностей микроструктуры образцов пиролизного остатка проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN Vega 3SBH. Микроструктура образцов углеродистого остатка пиролиза текстильных отходов представлена на рис. 1.

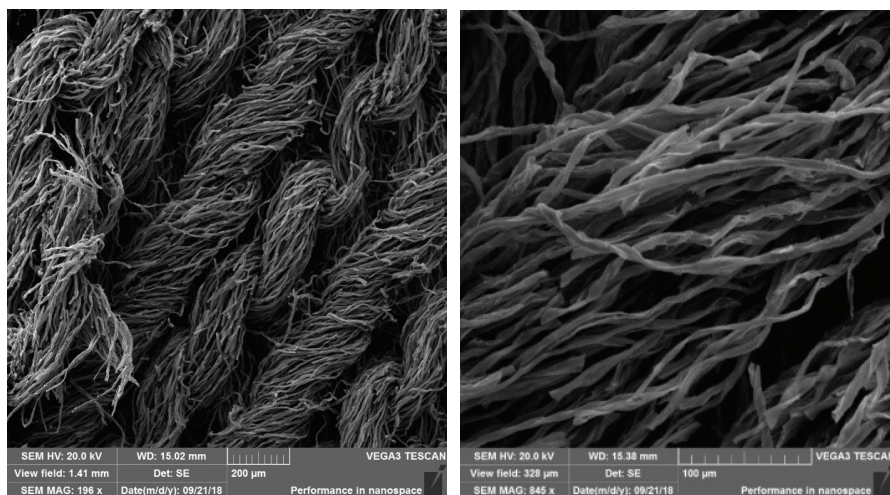


Рис. 1. Фотографии участков микроструктуры образцов углеродистого остатка пиролиза текстильных отходов

Результаты СЭМ показывают, что пиролизный остаток сохраняет структуру исходного материала, однако становится хрупким и приобретает черно-серый цвет.

Создание новых материалов, свойства которых определяются такими факторами, как физико-химические превращения, скорость нагрева, широкий температурный диапазон и др., требует проведения экспериментальных исследований по определению их теплофизических характеристик.

Целью настоящего исследования является определение теплофизических свойств (удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности) керамического материала, полученного с использованием пиролизного остатка текстильных отходов.

Для определения коэффициента теплопроводности керамического материала использовали известный экспериментальный метод — стационарный метод цилиндрического слоя [1; 2].

Из результатов анализа данных, представленных на рис. 2, видно, что коэффициент теплопроводности неравномерно возрастает с уве-

личением температуры. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида:

$$\lambda = 0,431 + 1,3 \cdot 10^{-3} t - 3,0 \cdot 10^{-6} t^2 + 3,0 \cdot 10^{-9} t^3$$

с достоверностью $R^2 = 0,98$.

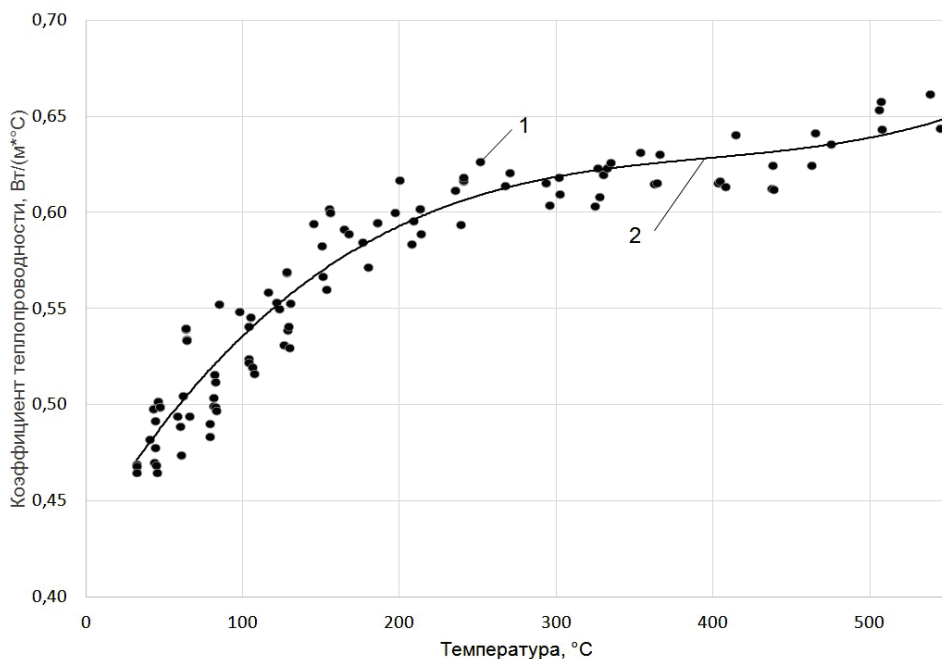


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности модифицированной керамики от температуры:

1 — эксперимент; 2 — аппроксимация

Для экспериментального определения теплоемкости использовали калориметрический метод [3]. Удельную теплоемкость рассчитывали по уравнению теплового баланса.

Полученные данные (рис. 2) аппроксимированы линейным уравнением вида:

$$c = 550,81 + 10,125t$$

с достоверностью $R^2 = 0,96$.

Анализ результатов, представленных на рис. 3, говорит о возрастающем характере теплоемкости исследуемого материала с увеличением температуры.

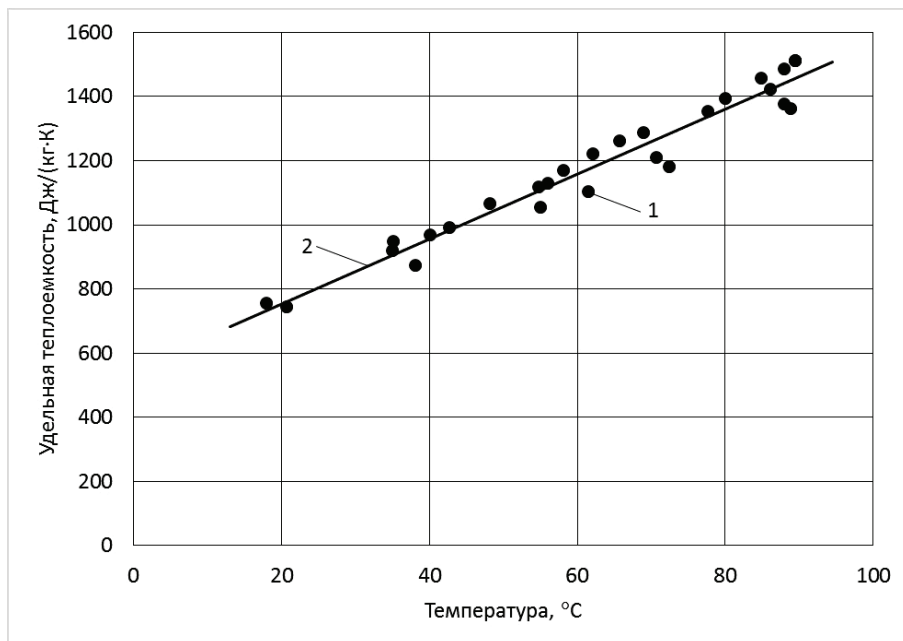


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости керамики от температуры:

1 — эксперимент; 2 — аппроксимация

Полученный керамический материал рекомендуется использовать в технологии производства строительных изделий различного назначения.

Список источников

1. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М. : Энергия, 1979. 319 с.
2. Четверикова А. Г., Каныгина О. Н., Кулеева А. Х. Теплоемкость кремнеземистой керамики при умеренных температурах // Вестник Кыргыз.-Рос. славян. ун-та. 2011. № 11. С. 72–76.
3. Тепло- и массообмен и теплотехнический эксперимент / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М. : Энергоиздат, 1982. 510 с.

УДК 621.18-5

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА» НА БАЗЕ ПТК «СУРА»

О. А. Кузнецов¹, А. Ю. Кисельников², Н. Н. Акифьева³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ok0020@mail.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты расчетной оценки показателей надежности выполнения функции «технологическая защита», реализуемой программно-техническим комплексом «Сура».

Ключевые слова: АСУ ТП, ПТК «Сура», технологические защиты, надежность, отказы ПТК

ASSESSMENT OF RELIABILITY OF THE FUNCTION “TECHNOLOGICAL PROTECTION” ON THE SHC “SURA”

O. A. Kuznetsov¹, A. Yu. Kiselnikov², N. N. Akif'eva³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ok0020@mail.ru

Abstract. The report presents the results of a calculated assessment of the indicators of the reliability of the “technological protection” function implemented by the “Sura” software and hardware complex.

Keywords: APCS, SHC “Sura”, technological protection, reliability, SHC failures

Программно-технический комплекс (ПТК) «Сура» является современным отечественным комплексом аппаратуры и программного обеспечения, разработанным специалистами научно производственного комплекса «Элара» для создания автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) и локальных систем автоматического управления (САУ). Функция «технологическая

защита» (ТЗ) предназначена для предотвращения развития аварийных ситуаций, грозящих повреждением оборудования. Важнейшее требование к ТЗ — надежность действия при появлении аварийной ситуации.

Расчетная оценка проводилась в целях подтверждения соответствия настоящего показателя для ПТК «Сура» российского производителя требованиям отраслевых стандартов в энергетике [1].

Исходными данными для проведения расчетов показателей надежности выполнения функций ПТК являются следующие показатели надежности типовых модулей и блоков контроллера Эликонт-100 [2]:

- 1) T_{oi} — наработка i -го элемента на отказ, ч;
- 2) T_{vi} — среднее время восстановления i -го элемента, при индицируемом средствами диагностики ПТК отказе, ч;
- 3) α — часть отказов, диагностируемая только при периодических проверках;
- 4) β — часть отказов элементов, приводящих к отказу функции ТЗ типа «ложное срабатывание».

Надежностные взаимосвязи технических средств ПТК в целом, а также технических средств, участвующих в выполнении каждой функции ПТК, задаются в виде надежностно-функциональных схем (НФС), основанием для построения которых являются электрические и логические (программные) связи программно-технического комплекса. На рис. 1 представлена НФС функции «технологическая защита», построенная на базе анализа электрических схем и программных связей ПТК «Сура».

Расчеты показателей надежности приводится при следующих допущениях:

- 1) рассчитываемые системы и их элементы являются восстанавливаемыми, восстановление полное и неограниченное;
- 2) работа элементов непрерывна и полностью или частично контролируется, контроль абсолютно надежный;
- 3) рассматривается только структурное резервирование, временной резерв не учитывается;
- 4) резерв нагруженный, время переключения резерва — мгновенное;
- 5) отказы считаются независимыми;
- 6) внеочередное техническое обслуживание не учитывается;
- 7) оценка времени восстановления восстанавливаемых элементов проводится по среднему значению времени восстановления частично контролируемого элемента.

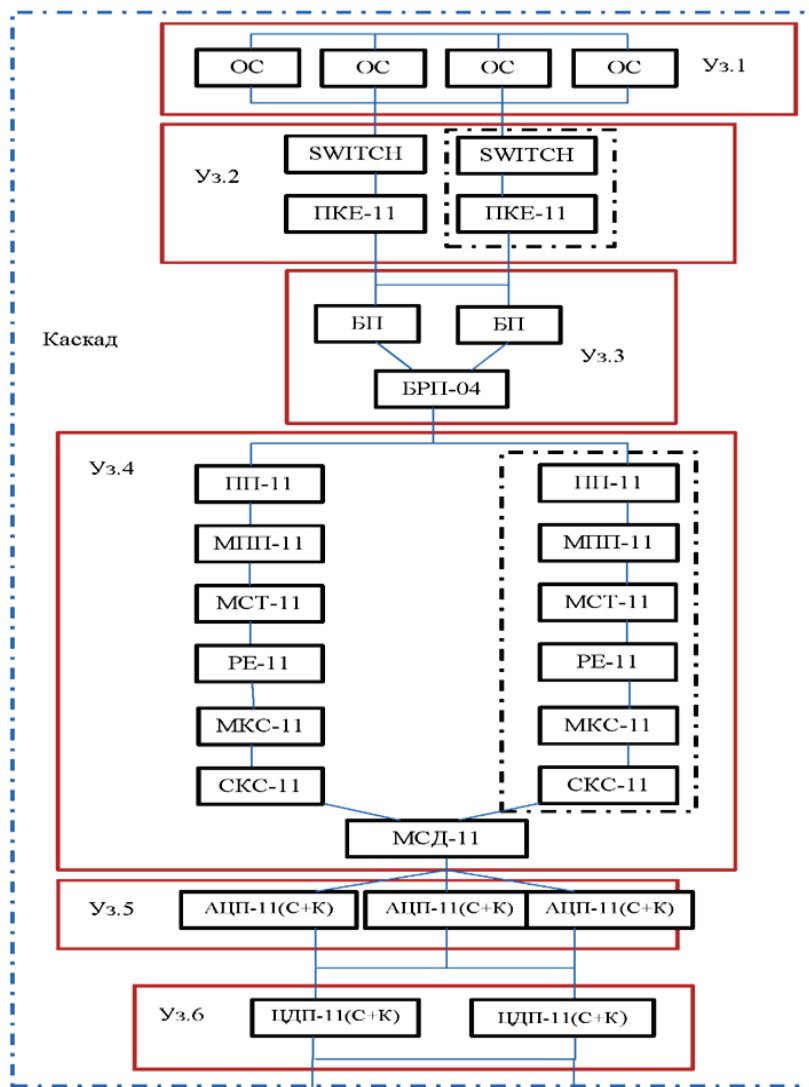


Рис. 1. НФС функции ТЗ

Надежность функции ТЗ оценивается по следующим параметрам [1]:

1) вероятность несрабатывания при запросе $Q(t)$: группа А — не более 0,002; группа Б — не более 0,007;

2) параметр потока «ложное срабатывание» $W_{л.с.}$, 1/г.: группа А — не более 0,02 1/г.; группа Б — не более 0,05 1/г.

Расчет параметров надежности проводился согласно формулам [3] по принципу объединения типовых блоков и модулей в узлы (с ис-

пользованием последовательного, параллельного соединения, резервирования с замещением при использовании переключателя резерва, мажоритарного резервирования).

Итоговые значения расчетов для узлов и каскада представлены в таблице.

Таблица

Итоговые параметры надежности НФС

Название	Время наработки на отказ, T_o , ч	Время восстановления (ВВ), T_v , ч	ВВ по типу «ложное срабатывание», $T_{ол.с}$, ч	Поток ложного срабатывания, $W_{л.с}$, 1/г.	Вероятность критического отказа, $Q(t)$
Узел 1	4,15E (+13)	1,25	1 E (+25)	1 E (–20)	1,81E (–13)
Узел 2	1,23E (+9)	2,91	9,06E (+15)	9,64E (–13)	1,42E (–8)
Узел 3	1,95E (+8)	1638,1	1,95E (+16)	4,48E (–13)	5,04E (–5)
Узел 4	2,73E (+6)	232,2	3,02E (+9)	2,89E (–6)	5,09E (–4)
Узел 5	1,13E (+7)	1713	9,68E (+8)	9,03E (–6)	9,02E (–4)
Узел 6	3,52E (+8)	227,8	2,28E (+11)	3,83E (–8)	3,89E (–6)
Каскад	2,16E (+6)	528,5	7,31E (+8)	1,19E (–5)	1,46E (–3)

Примечание. Вероятность критического отказа рассчитывалась для потока защитных требований $W_{з.т} = 6$ 1/г.

Итоговые рассчитанные значения параметров надежности проходят по группе А [1], что свидетельствует о высокой надежности ПТК «Сура».

Список источников

1. РД 153-34.1-35.137-00. Технические требования к подсистеме технологических защит, выполненных на базе микропроцессорной техники. М. : СПО ОРГРЭС, 2000. 30 с.
2. Программное обеспечение ПТК «Сура» [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://ptk-sura.ru/about/software/> (дата обращения: 07.12.2021).
3. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М. : Совет. Радио, 1975. 471 с.

УДК 662.613.1

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ КАРБОНИЗАЦИИ ЗОЛОВЫХ ОТХОДОВ ТЭС

А. К. Матюхина¹, Г. Е. Масленников², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ nastasiya_mak@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены методы минерализации CO_2 летучей золой, их преимущества и недостатки. Подробно рассмотрен прямой водный маршрут, который включает прямую реакцию летучей золы с CO_2 в одном реакторе с водой в качестве реакционной среды.

Ключевые слова: CCUS, минерализация, карбонизация, летучая зола, CO_2

BASIC METHODS OF CARBONIZATION OF ASH WASTE TPP

A. K. Matyukhina¹, G. E. Maslennikov², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ nastasiya_mak@mail.ru

Abstract. The paper discusses the methods of CO_2 mineralization with fly ash, their advantages and disadvantages. The direct water route is considered in detail, which includes the direct reaction of fly ash with CO_2 in a single reactor with water as a reaction medium.

Keywords: CCUS, mineralization, carbonation, fly ash, CO_2

Летучая зола имеет большой потенциал для улавливания, утилизации и хранения CO_2 . Классификация методов минерализации CO_2 представлена на рис. 1.

Карбонизация летучей золы может осуществляться любым из трех методов: прямым сухим/полусухим, прямым водным и непрямым вариантами [1].

Прямой метод включает впрыск CO_2 в сухую или увлажненную зольную пыль или водную суспензию летучей золы. В этом процессе катио-

ны из летучей золы, такие как Ca^{2+} и Mg^{2+} , выщелачиваются в раствор и затем осаждаются в виде карбонатов на поверхности частиц золы. Непрямой маршрут включает в себя сначала выщелачивание катионов в раствор с использованием экстракционного агента, который может быть водой, кислотами (HNO_3 , уксусной кислотой) или основаниями (KOH , NaOH), и последующее взаимодействие в отдельном реакторе полученного раствора с CO_2 для получения карбонатов Ca , Mg или Na в зависимости от наиболее распространенного элемента летучей золы.

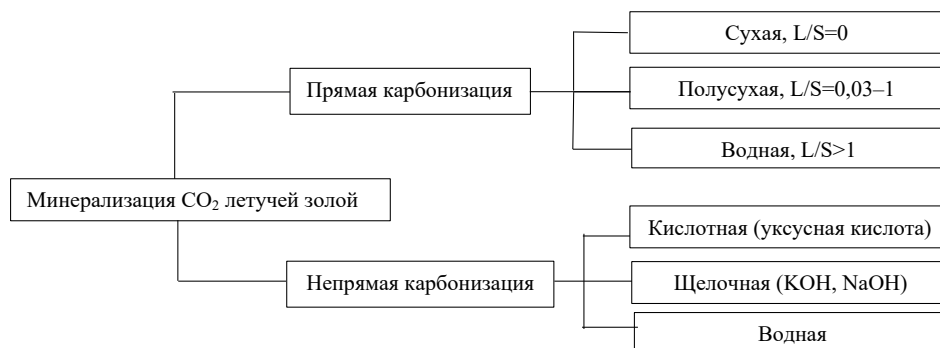


Рис. 1. Методы минерализации CO_2 летучей золой

Преимущество прямого маршрута в том, что он прост в реализации и не требует большого количества химических реагентов, что делает этот маршрут наиболее перспективной технологией улавливания CO_2 с использованием летучей золы [2]. Водный путь является более предпочтительным, поскольку достижимы более высокие скорости реакции по сравнению с сухим методом [3]. Однако наилучшие результаты по скорости процесса получены полусухим методом [4], в котором время карбонизации составило менее 10 минут.

Преимущество непрямого метода в том, что карбонаты могут быть получены в чистом виде в отличие от прямого, когда осажденный карбонат смешивается с остаточной матрицей летучей золы. Продукты прямой карбонизации подходят, например, для использования в качестве добавок к цементу.

Исследования минеральной карбонизации с использованием угольной золы уноса сосредоточены в основном на прямом водном маршруте. В присутствии воды летучая зола реагирует с CO_2 в 3 этапа [1], уравнения (1)– (4). На первом этапе происходит растворение изве-

сти (СаО), катионы Ca^{2+} высвобождаются в раствор и повышается рН среды. Это облегчает начало второй стадии, в которой поглощение CO_2 максимизируется осаждением CaCO_3 , что благоприятно при высоких значениях рН. Поскольку Са расходуется на осаждение CaCO_3 , снижается рН. Наконец, когда рН становится достаточно низким, начинается растворение периклаза (MgO) с последующим образованием растворенного бикарбоната магния.

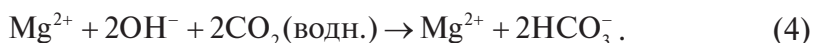
Растворение кальция:



Самопроизвольная карбонизация гидроксида кальция в суспензии:



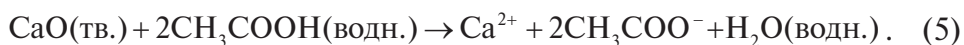
Растворение периклаза и образование $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$:



Прямая карбонизация также может быть осуществлена полусухим способом, при котором влага заполняет только поры частиц, превращая их микрореакторы с водным процессом. Низкое содержание воды облегчает диффузию CO_2 к зонам реагирования, ускоряет реакцию, а также облегчает сушку готового продукта.

При непрямом маршруте минерализация происходит путем барботирования CO_2 через раствор предварительно выщелоченных оксидов металлов летучей золы. Оба процесса (выщелачивание и карбонизация) проводятся в отдельных реакторах. Эффективность такого процесса часто зависит от вида используемого экстрагирующего раствора и его способности извлекать ионы Ca^{2+} из матрицы летучей золы. Кислоты обычно предпочтительнее воды, потому что они могут более эффективно извлекать Са. Ранее исследовали непрямую минерализацию CO_2 , на первой стадии которой был получен экстракт кальция взаимодействием летучей золы с уксусной кислотой [5].

Растворение кальция:



Карбонизация:



В заключение можно сделать вывод, что наиболее привлекательным методом карбонизации золы на тепловой электростанции (ТЭС) является прямой способ, позволяющий повышать характеристики золы для дальнейшего применения в строительной промышленности. Однако вопрос выбора между водным или полусухим методом остается открытым: оба способа близки по эффективности, однако по скорости протекания процесса приводятся противоречивые данные, что требует дополнительных исследований.

Список источников

1. Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage [Electronic resource] / A. Dindi [et al.] // Journal of CO₂ Utilization. 2019. Vol. 29. P. 82–102. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.11.011 (date of access: 00.00.0000).
2. Investigation of accelerated carbonation for the stabilisation of MSW incinerator ashes and the sequestration of CO₂ [Electronic resource] / M. F. Bertos [et al.] // Green Chem. 2004. Vol. 6, iss. 8. P. 428–436. DOI: 10.1039/b401872a (date of access: 00.00.0000).
3. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration [Electronic resource] // J. Clean. Prod. 2016. Vol. 112, part 5. P. 4173–4182. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.145 (date of access: 10.11.2020).
4. Instantaneous capture and mineralization of flue gas carbon dioxide: Pilot scale study [Electronic resource] / K. J. Reddy [et al.] // Nature Precedings. 2010. P. 1–11. DOI: 10.1038/npre.2010.5404.1 (date of access: 10.11.2020).
5. Sun Y., Parikh V., Zhang L. Sequestration of carbon dioxide by indirect mineralization using Victorian brown coal fly ash [Electronic resource] // J. Hazard. Mater. 2012. Vol. 209–210. P. 458–466. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.01.053 (date of access: 10.11.2020).

УДК 502.654

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

Ю. А. Мезенина¹, С. П. Настенко², А. И. Вальцева³, Н. В. Вальцев⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ Alex-Liga@yandex.ru

Аннотация. В статье изложены способы и результаты лабораторных опытов первичной биологической рекультивации золоотвалов.

Ключевые слова: рекультивация, золоотвал, зола, фитоценоз

LABORATORY EXPERIENCE OF PRIMARY BIOLOGICAL REMEDIATION

Yu. A. Mezenina¹, S. P. Nastenکو², A. I. Valtseva³, N. V. Valtsev⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ Alex-Liga@yandex.ru

Abstract. The article describes the methods and results of laboratory experiments on the primary biological reclamation of ash dumps.

Keywords: reclamation, ash dump, ash, phytocenosis.

В Российской Федерации золошлаковые отходы перерабатываются в очень малых объемах, обычно их добавляют в цементы и клинкер. Зола угля — это остаток негорючих веществ, образовавшихся после полного сгорания ископаемого топлива. В России сжигается более 123 млн т твердого топлива при колебании зольности углей от 18 до 45 %. Годовой выход золы и шлака от тепловых электростанций (ТЭС) в среднем составляет примерно 25 млн т, тогда как используется не более 2 млн т. Вся остальная зола отправляется на золоотвалы.

Примерно 25 % электрических станций Российской Федерации используют в качестве топлива уголь [1]. В настоящее время золошлаковые отходы ТЭС лишь на 10 % используются в различных отраслях производства, хотя потенциал их использования гораздо шире. Однако большая часть золошлаковых отходов складывается на золошлакоотвалах. Золоотвалы — это своеобразные элементы техногенного ландшафта, создаваемые путем аккумуляции золы, образующейся при сжигании твердого топлива. Отработанные золошлакоотвалы представляют собой сложные техноприродные системы, которые относятся к измененным (или сильно нарушенным) геологическим системам, а по степени хозяйственной ценности такие системы относятся к аккультурным промышленным комплексам [2].

Процесс восстановления таких объектов, как золоотвалы, обязательно должен завершаться этапом биологической рекультивации в целях регенерации биоценозов, т. е. создания в условиях отдельного экотопа нового почвогрунта с устойчивыми растительными сообществами. При этом, прежде чем проводить этап биологической рекультивации, необходимо провести технический этап, целью которого является планировка и формирование откосов, снятие и нанесение плодородного слоя почвы, устройство мелиоративных и гидротехнических сооружений, если необходимо — захоронение токсичных отходов.

Существует также несколько вариантов рекультивации: сельскохозяйственная, лесохозяйственная, рыбохозяйственная, водоохранная, рекреационная, санитарно-гигиеническая и строительная. Однако не все техногенные экотопы подлежат сельскохозяйственной рекультивации в силу их химического загрязнения, низкой плодородности. Рыбохозяйственное и водохозяйственное направления рекультивации связаны с созданием на рекультивируемых землях водоемов, что ограничивает возможности таких направлений; то же можно сказать о строительном, санитарно-гигиеническом и рекреационном направлениях. Другими словами, одним из наиболее перспективных и широко распространенных направлений рекультивации нарушенных земель является лесохозяйственное. Лесная рекультивация обеспечивает оздоровление территории даже в районах с преобладанием техногенных ландшафтов («индустриальных пустошей») и с резко осложненным рельефом. Лесные насаждения, создаваемые в процес-

се рекультивационных работ, защищают ландшафт от катастрофического развития водной и ветровой эрозии, способствуют улучшению гидрологического режима, снижают интенсивность загрязнения окружающей территории. Особо следует отметить, что лесная рекультивация менее дорогостоящая, чем сельскохозяйственная [3].

Зола ТЭС с момента поступления ее на золоотвал во влажном состоянии представляет собой субстрат, относительно пригодный для прорастания семян, формирования проростков и всходов многих видов цветочных растений [4]. Однако формирование растительного и почвенного покрова на свежих золоотвалах протекает довольно медленно, и отвалы в естественном состоянии лишены полного растительного покрова, также существует проблема уноса ветром семян с ровной поверхности золоотвала. Самозаращение золоотвала происходит медленно, в основном за счет сорных трав. Исходя из этого, рядом авторов [5] представляется экономически наиболее выгодным покрытие золоотвала 2-сантиметровым слоем почвы, что позволяет в течение 5–10 лет создать растительный покров, вполне достаточный, чтобы предотвратить пыление. Растительный слой формируется при этом из многолетних трав и растений. Развитие корневых систем растений позволяет закрепить подвижный субстрат золоотвалов, в результате чего возможно формирование плодородного субстрата. Важно отметить, что ряд ученых [6] отмечает невозможность восстановления полноценных лесных массивов по причине того, что уже через 10 лет корневые системы не могут обеспечивать необходимое деревьям питание.

В целях изучения возможности рекультивации золоотвала Рефтинской ГРЭС были взяты пробы зольного субстрата. Результаты химического анализа представлены в таблице. Макроэлементный состав золошлаков характеризуется преобладанием кремнезема, что позволяет считать их кремнистыми. Содержание кремнезема изменяется от 47 до 60,2 %. Содержание Al_2O_3 изменяется от 15,61 до 30,92 %. Содержание суммарного железа не превышает 5 %, составляет в среднем около 3,35 %. Содержание CaO и MgO не превышает 1,5 и 1,0 % соответственно, что также указывает на кислый силикатный состав золошлаков. Щелочные элементы K_2O и Na_2O в сумме не превышают 1,5 %. Также было обнаружено, что в исследуемых образцах органические вещества не содержатся.

Таблица

Среднее содержание макроэлементов
в золошлаках золоотвала № 2 Рефтинской ГРЭС

№ п/п	Наименование составляющих	Массовая доля, % (усредненное значение)
1	SiO ₂	60,200
2	Al ₂ O ₃	30,920
3	CaO	1,280
4	Fe ₂ O ₃	3,350
5	SO ₃	0,153
6	MgO	0,577
7	Na ₂ O	0,525
8	K ₂ O	0,750
9	TiO ₂	1,170
10	P ₂ O ₅	0,482
11	RuO ₂	0,219
12	Прочие примеси (BaO, SrO, F, MnO)	1,900

Естественное зарастание золоотвала отсутствует, т. к. на поверхности золоотвала была обнаружена дефляция золы, которая создает неблагоприятные условия для формирования естественных растительных сообществ. Исходя из этого, считается, что саморекультивация золоотвала невозможна.

В целях установления возможности произрастания культур-фитомелиорантов на золоотвале Рефтинской ГРЭС планируется провести лабораторные исследования для выяснения оптимального варианта засева техногенного экотопа. Для первых лабораторных экспериментов были взяты семена бобовых и злаковых культур: в три горшка были посажены семена гороха «Ранний-301» и кукурузы «Лакомка-121». Посадка семян производилась в пластмассовые горшки высотой 100 мм, из которых 75 мм был слой золы, а 25 мм — слой земли «Грунт Универсальный», семена были помещены на глубину 5 мм и обильно политы. Для ускорения прорастания семян был сделан «парник» из пищевой пленки, как показано на рис. 1.

Первые ростки появились на второй день после посадки, на седьмой день после высадки семян в смесь грунта и зольного субстрата появились ростки высотой от 3 до 200 мм при температуре воздуха в по-

мещении 23 °С, влажности 65 %; ростки показаны на рис. 2. Полив семян производился ежедневно.

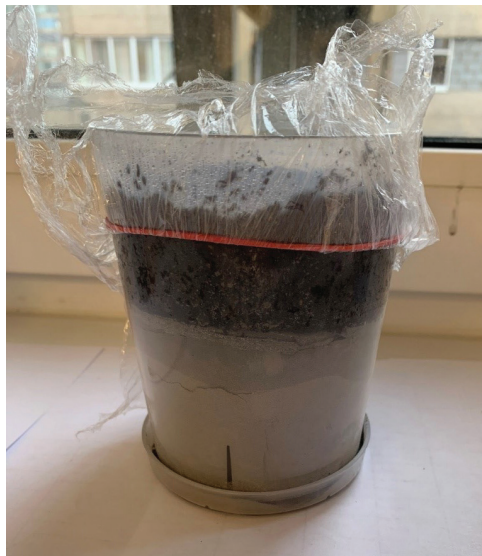


Рис. 1. Мини-парник



Рис. 2. Ростки на седьмой день эксперимента:
первый слева — кукуруза, остальные — горошек

Первые данные свидетельствуют о достаточно неплохой всхожести бобовых и злаковых культур при проведении первичной биологической

рекультивации золоотвалов с нанесением слоя плодородной почвы для последующего создания разнотравно-полынно-злакового фитоценоза.

Список источников

1. Дятел Т. Россия держится за уголь. ТЭС на твердом топливе сохраняют свою нишу [Электронный ресурс] // Коммерсант. 2019. 1 февр. № 18. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3869013> (дата обращения: 27.10.2020).
2. Гурина И. В., Ширенко А. И. Особенности биологической рекультивации золоотвалов // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: материалы междуна- род. науч.-практ. конф., Москва, 11–14 апр. 2009 г. М. : МГУП, 2009. С. 135–139.
3. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель [Электронный ресурс] / Т. С. Чибрик [и др.] ; науч. ред. В. Н. Большаков. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2011. 268 с. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/28160> (дата обращения: 11.11.2020).
4. Серая Г. П., Комов С. В. К вопросу об участии цветочных растений в начальном освоении и преобразовании зольного субстрата [Электронный ресурс] // Растения и промышленная среда. Свердловск : УрГУ, 1974. С. 97–108. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/30160> (дата обращения: 11.11.2020).
5. Хамидуллина М. В. Особенности роста и развития многолетних растений на плотных золоотвалах [Электронный ресурс] // Растения и промышленная среда : сб. науч. работ каф. ботаники Урал. гос. ун-та им. А. М. Горького. Свердловск : УрГУ, 1964. С. 134–145. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/30171> (дата обращения: 11.11.2020).
6. Вишня Б. Л., Шульман В. Л., Орлов А. В. Методы рекультивации отработанных золоотвалов ТЭС [Электронный ресурс] // Биологическая рекультивация нарушенных земель : материалы Международ. совещ. Екатеринбург, 26–29 авг. 1996 г. Екатеринбург : УрО РАН, 1997. С. 22–31. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1592/4/1333428_matmeet1997.pdf (дата обращения: 11.11.2020).

УДК 544.431.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СУХОЙ ТЕПЛОЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ-ГАЗА В РЕАКТОРЕ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

**Я. О. Морозов¹, У. В. Жижина², Ю. А. Каграманов³,
С. А. Грицук⁴, В. Г. Тупоногов⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² uly-zhh@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе произведено моделирование гидродинамики процесса сухой тепловой сероочистки синтез-газа в реакторе с циркуляционным кипящим слоем (ЦКС). С помощью модели выполнены расчеты влияния скорости, массы слоя и удельного расхода твердых частиц по высоте реактора на концентрацию твердой фазы. Проведена верификация расчетов на холодном стенде с циркуляционным слоем.

Ключевые слова: синтез-газ, сероочистка, ЦКС, ANSYS

MODELING OF HYDRODYNAMICS OF THE PROCESS OF DRY WARM DESULPHURIZATION OF SYNTHESIS GAS IN A REACTOR WITH A CIRCULATING FLUIDIZED BED

**I. O. Morozov¹, U. V. Zhizhina², Y. A. Kagramanov³,
S. A. Gritsuk⁴, V. G. Tuponogov⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² uly-zhh@mail.ru

Abstract. In this paper, the hydrodynamics of the process of dry warm desulphurization of synthesis gas in a reactor with a CFB was simulated. The model was used to calculate the effect of the velocity, bed mass, and specific flow rate of solid particles over the reactor height on the solid phase con-

centration. The calculations were verified on a cold stand with a circulating fluidized bed.

Keywords: synthesis gas, desulfurization, CFB, ANSYS

Введение. Благодаря недавно появившимся системам сухой тепловой сероочистки синтез-газа (WGC), эффективность парогазового цикла (IGCC) может существенно увеличиться [1], при одновременном уменьшении капитальных и эксплуатационных затрат [2].

Схема сероочистки состоит двух реакторов, рис. 1.

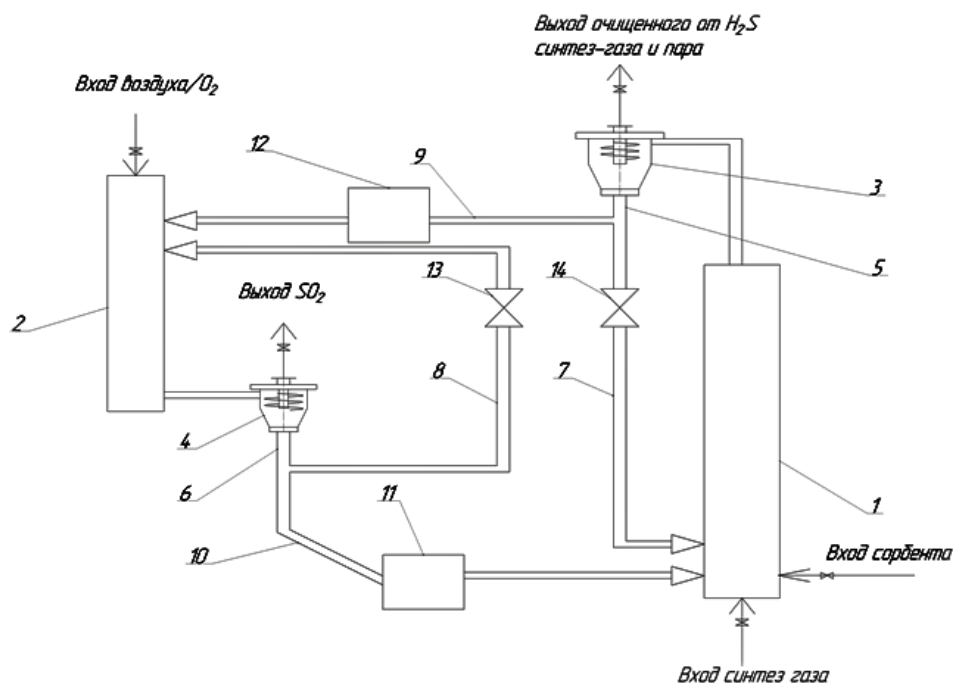


Рис. 1. Элемент схемы ПГУ

Синтез-газ и поток сорбента, содержащий оксид цинка, подаются в подъемную шахту адсорбера с циркуляционным кипящим слоем 1, в которой смешиваются и вступают в реакции. Далее двухфазная смесь поступает в циклон адсорбера 3, в котором происходит отделение сорбента, содержащего сульфид цинка, от очищенного сероводорода газа. В опускном стояке адсорбера 5 поток разделяется, часть сорбента поступает в перепуск адсорбера 7, а другая — в переточную трубу адсорбера 9, на которой установлен гидрозатвор адсорбера 12, препятствующий

щий перетеканию кислорода в объем адсорбера. Регенерация сорбента происходит в шахте регенератора 2. Преимуществом такой схемы является нисходящая компоновка регенератора, в которой поток сорбента падает и не требует лишних затрат энергии на подъем [3]. Отделение восстановленных частиц сорбента, содержащих оксид цинка, от газа, содержащего оксид серы, происходит в циклоне регенератора 4. Далее очищенный сорбент выпадает в опускной стояк регенератора 6 и разделяется на два потока. Часть сорбента поступает в перепуск регенератора 8, а другая — в переточную трубу регенератора 10 и направляется обратно в подъемную шахту адсорбера, проходя через гидрозатвор регенератора 11, препятствующий смешению газовых потоков синтез газа и кислорода.

Методика расчета. Расчет гидродинамики производится в первую очередь, его результаты дают представление о распределении концентраций частиц и об их времени пребывания в установке, на основе этих расчетов будет строиться расчет гетерогенных процессов. Для расчетов использовалась программа ANSYS Fluent.

Результаты. Концентрация твердой фазы показала монотонное убывание по высоте подъемной шахты, рис. 2. До отметки в один метр различия между режимами не наблюдается, т. к. масса слоя неизменна (рис. 2, а). После этой отметки начинает усиливаться вклад нисходящих потоков, твердая фаза осыпается в десять раз интенсивнее при скорости 3,75 м/с в сравнении с режимом со скоростью 6,3 м/с. Увеличение массы слоя приводит к поднятию уровня концентрации без изменения наклона кривой. Изменение массы слоя также не изменило монотонность убывания концентрации (рис. 2, б).

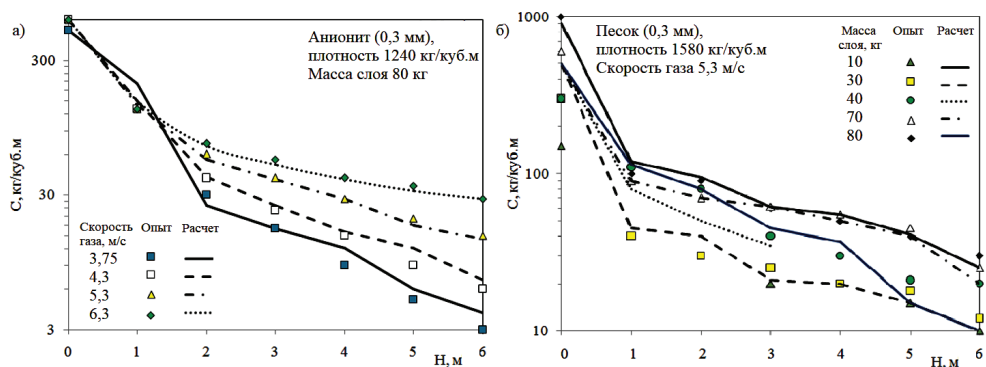


Рис. 2. Влияние скорости (а) и массы слоя (б) на распределение концентрации твердой фазы по высоте

Влияние материала аналогично массе слоя не вносит корректировок в форму кривой концентрации, меняя лишь ее уровень. Уровень кривой концентрации песка выше уровня кривой анионита, пропорционально разнице плотностей. Аналогичная ситуация наблюдается и с удельным массовым расходом твердой фазы (рис. 3).

Скорость газа максимальна на оси и минимальна (равна нулю) на стенке. Снижение скорости приводит к возникновению нисходящего потока сорбента вблизи стенки, она распределяется неравномерно и имеет экстремум. У стенки направление скорости отрицательно, но ввиду отсутствия сопротивления со стороны газа по модулю скорость твердой фазы максимальна. Вблизи стенки наблюдается скачек концентрации твердой фазы, кольцевое уплотнение, характерное для дисперсного потока (рис. 4).

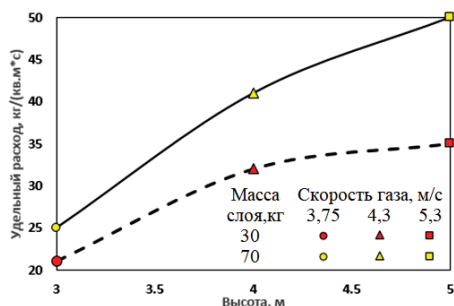


Рис. 3. Удельный расход твердых частиц по высоте реактора

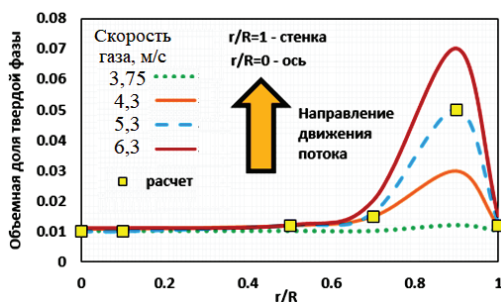


Рис. 4. Радиальное распределение объемной доли твердой фазы

Результаты показывают адекватность расчетной модели и совпадение с результатами экспериментов [4].

Заключение. Выбранная расчетная модель подтвердила свою адекватность при сравнении результатов расчетов по ряду параметров в широком диапазоне режимов работы установки в холодном режиме при атмосферном давлении. Были обнаружены сходимости при оценке концентраций твердой фазы вдоль высоты реактора при переменных скоростях, массах слоя и плотностях гранул.

Список источников

1. Abaimov N. A., Ryzhkov A. F. Development of advanced air-blown entrained-flow two-stage bituminous coal IGCC gasifier [Electronic resource] // EPJ Web of Conf. 2017. Vol. 159. P. 1–5. DOI: 10.1051/epjconf/201715900001 (date of access: 15.11.2020).

2. Monazam E. R., Shadle L. Fuel Gas Clean-up in a Transport Reactor: Model Development and Analysis [Electronic resource] // 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion, May 22–25, 2005. Toronto, Ontario, Canada. DOI: 10.1115/FBC2005-78082 (date of access: 15.11.2020).

3. Ghadirian E., Abbasian J., Arastoopour H. CFD simulation of gas and particle flow and a carbon capture process using a circulating fluidized bed (CFB) reacting loop [Electronic resource] // Powder Technology. 2019. Vol. 344. P. 27–35. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.102 (date of access: 15.11.2020).

4. Hydrodynamics of interconnected reactors for polygeneration systems and chemical looping combustion and gasification [Electronic resource] / G. A. Ryabov [et al.] // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 13, iss. 1. P. 1–22. DOI: 10.17654/HM013010001 (date of access: 15.11.2020).

УДК 662.76

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСТАНОВКИ УСКОРЕННОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ

В. В. Назарова¹, Г. Е. Масленников², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ vika_n@inbox.ru

Аннотация. В работе рассмотрен процесс ускоренной карбонизации минералов (accelerated carbonation of minerals, АМС). Такая технология в настоящее время считается перспективной для улавливания и хранения углерода. В программном комплексе COCO Simulator выполнен термодинамический расчет установки АМС для улавливания и минерализации CO₂ из дымовых газов.

Ключевые слова: зола, углекислый газ, ускоренная карбонизация, улавливание CO₂, минерализация CO₂

VERIFICATION OF THERMODYNAMIC CALCULATION OF ACCELERATED MINERAL CARBONIZATION UNIT

V. V. Nazarova¹, G. E. Maslennikov², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ vika_n@inbox.ru

Abstract. The paper considers the process of accelerated carbonation of minerals (AMC). This technology is currently considered promising for carbon capture and storage. A thermodynamic calculation of the AMC installation for capturing and mineralizing CO₂ from flue gases was performed in the COCO Simulator software package.

Keywords: ash, carbon dioxide, accelerated mineral carbonation, capture CO₂, mineralize CO₂

Ускоренная карбонизация — это технологический процесс, имитирующий естественные процессы выветривания, при котором

CO₂ реагирует с материалами, содержащими основные оксиды металлов, с образованием стабильных и нерастворимых карбонатов, но с гораздо более низким временем протекания реакций (от нескольких часов до десятков минут) [1]. Такую технологию рассматривают как перспективный метод улавливания и хранения CO₂ [2].

Процесс AMC [3] состоит из следующих элементов: осушитель (MRD), дутьевой вентилятор, увлажнитель, нагреватель и реактор с кипящим слоем (FBR) (рис. 1). Дымовой газ отводится из дымовой трубы электростанции и подается в MRD с расходом около 0,094 м³/с и температурой 40 . В MRD улавливается сконденсированная влага для защиты дутьевого вентилятора. Увлажнитель и нагреватель позволяют контролировать влажность и температуру дымовых газов [3].

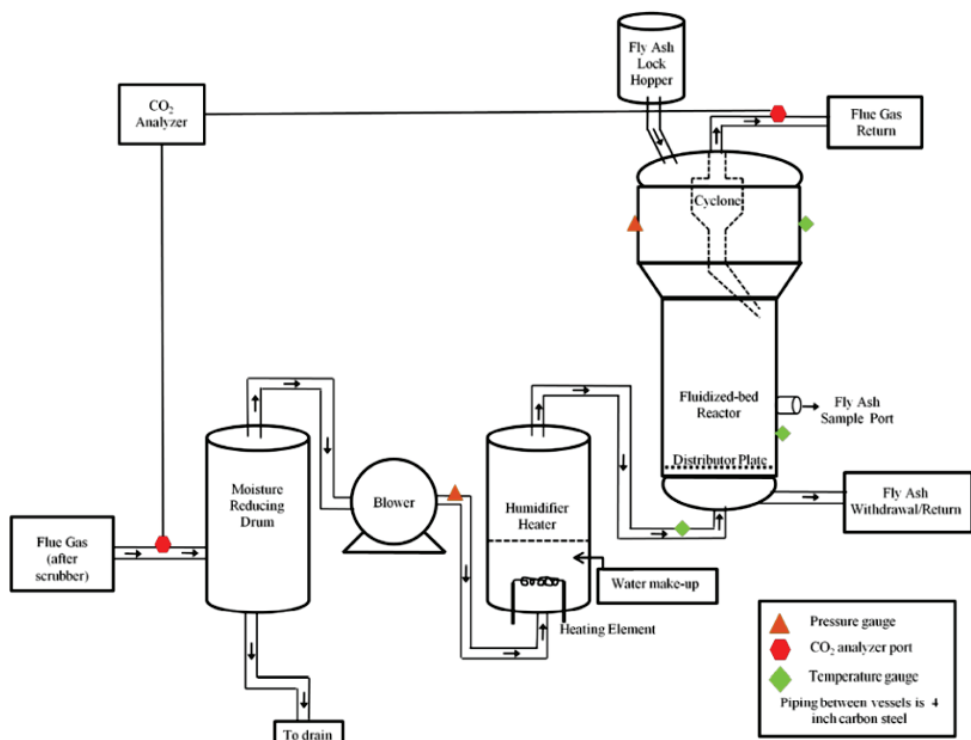
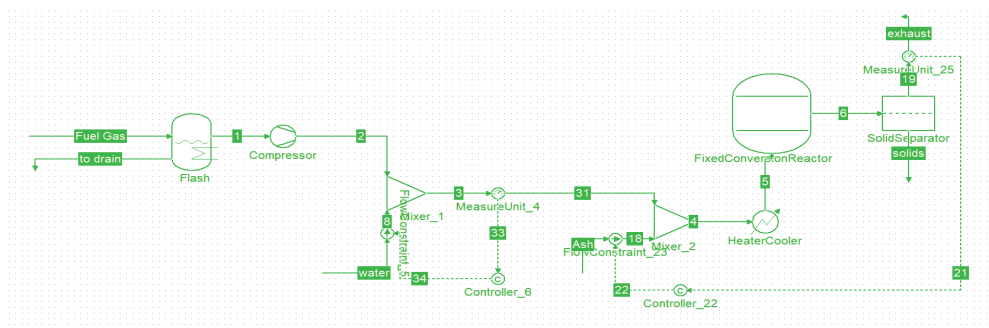


Рис. 1. Схема процесса AMC для прямого улавливания и минерализации CO₂ из дымовых газов [3]

Верхний вход реактора соединен с бункером золы для подачи необходимого количества свежего материала в реактор. Частицы летучей

золы псевдоожижаются потоком дымового газа, тем самым обеспечивается надлежащее перемешивание и хороший контакт между частицами и газом.

Расчет карбонизации выполняется в программном комплексе COCO Simulator. Расчетная схема процесса карбонизации золы, составленная в соответствии со схемой испытанной пилотной установки [3], представлена на рис. 2.



Значение эффективности карбонизации не приводится [3], поэтому полнота протекания реакций была принята 30 %, как для сухого процесса [4].

Верификация производится по концентрации CO_2 в газах после реактора и по содержанию CaCO_3 — в карбонизированной золе. Результаты верификации расчета, по данным [3], представлены в таблице, они говорят об адекватности модели.

Таблица

Верификация расчетной схемы

Показатель	Состав	До карбонизации [3]	После карбонизации	
			[3]	Расчет
Дымовые газы, мол. %	CO_2	13	9,6	9,6
Зола, мас. %	CaCO_3	0,10	3,5–4	3,98

Результаты расчета показывают, что степень конверсии CO_2 составляет 22,6 %, при этом улавливается 0,033 кг CO_2 /кг золы.

Список источников

1. Chiang P.-C., Pan S.-Y. Carbon Dioxide Mineralization and Utilization [Electronic resource] // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-3268-4_2 (date of access: 15.11.2020).
2. Yuen Y. T., Sharratt P. N., Jie B. Carbon dioxide mineralization process design and evaluation: concepts, case studies, and considerations [Electronic resource] // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 22309–22330. DOI: 10.1007/s11356-016-6512-9 (date of access: 15.11.2020).
3. Instantaneous Capture and Mineralization of Flue Gas Carbon Dioxide: Pilot Scale Study [Electronic resource] / K. J. Reddy [et al.] // Nature Precedings. 2010. DOI: 10.1038/npre.2010.5404.1 (date of access: 15.11.2020).
4. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO_2 sequestration [Electronic resource] // J. Clean. Prod. 2016. Vol. 112, p. 5. P. 4173–4182. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.145 (date of access: 15.11.2020).

УДК 661.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CO₂ ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОДЫ

В. В. Назарова¹, А. Д. Никитин², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ vika_n@inbox.ru

Аннотация. Вызванное экологическими проблемами сокращение эмиссии парниковых газов требует разработки экономически состоятельных технологий улавливания и использования CO₂. Предложена модернизация существующей технологии производства соды по методу Сольве, заключающаяся в замене минерального сырья (известняка) на CO₂ из дымовых газов тепловых электростанций (ТЭС). Преимуществами предлагаемой технологии являются отсутствие отходов за счет осуществления замкнутого цикла по хлору, а также готовность к практическому применению, обусловленная реализацией отдельных технологических процессов в промышленном масштабе.

Ключевые слова: улавливание CO₂, использование CO₂, метод Сольве, диоксид углерода, сода

USE OF CO₂ FROM TPP FLUE GASES IN THE PRODUCTION OF SODA

V. V. Nazarova¹, A. D. Nikitin², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ vika_n@inbox.ru

Abstract. Reducing greenhouse gas emissions caused by environmental concerns requires the development of economically viable technologies for capturing and using CO₂. The modernization of the existing technology for the production of soda by the Solvay method is proposed, which consists in replacing mineral raw materials (limestone) with CO₂ from the flue gases of TPP. The advantages of the proposed technology are the absence of waste due to the implementation of a closed

chlorine cycle, as well as the readiness for practical use, due to the implementation of individual technological processes on an industrial scale.

Keywords: capture CO₂, the use of CO₂, Solvay method, carbon dioxide, soda

Проблемы ужесточения норм выбросов вредных веществ и выполнение обязательств по сокращению эмиссии парниковых газов требуют разработки экологически и экономически состоятельных технологий улавливания CO₂ и его последующей утилизации [1; 2].

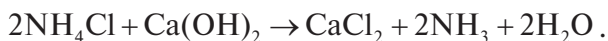
Перспективным направлением является утилизация CO₂ из дымовых газов тепловых электростанций (ТЭС) при производстве соды. Важными преимуществами являются значительные масштабы производства соды и, как следствие, большая емкость по CO₂, а также близость параметров CO₂ для производства соды к параметрам CO₂ из дымовых газов ТЭС.

Острой проблемой является истощение запасов известняка (в разрабатываемом настоящее время месторождении) для производства соды «Башкирской содовой компанией» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан).

Существующая технология производства соды в Стерлитамаке основана на методе Сольве [3]. Получение кальцинированной соды Na₂CO₃, которая является основным продуктом, описывается общим уравнением:



Регенерация аммиака осуществляется путем обработки хлорида аммония гашеной известью с образованием в качестве отхода хлорида кальция:



Используемый в производственном процессе известняк CaCO₃ является источником CO₂ непосредственно для процесса получения соды и CaO для получения гашеной извести, применяемой для регенерации аммиака. Известняк обжигается в работающих на твердом топливе (ископаемый уголь) печах, в которых происходит реакция:

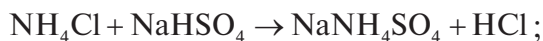


Для производства соды поступает очищенный от пыли газ, содержащий 37–40 % CO₂ и азот при температуре около 30 °С и атмосферном

давлении. Указанные параметры легко достигаются при одноступенчатой абсорбции CO_2 из дымовых газов ТЭС растворами аминов, что является частью общепринятой технологии улавливания CO_2 из дымовых газов после сжигания топлива [4].

Существенным недостатком технологии производства соды по методу Сольве является большое количество жидких отходов — около 9 м^3 на тонну соды [3].

Необходимым условием перехода к использованию CO_2 из дымовых газов ТЭС и отказа от использования известняка в процессе производства соды является возможность регенерации аммиака из хлорида аммония без применения известняка. Этот технологический процесс разработан для производства хлороводорода [5]. При взаимодействии хлорида аммония NH_4Cl с гидросульфатом натрия NaHSO_4 при температуре $220\text{--}270^\circ\text{C}$ выделяется хлороводород, а аммиак образует с гидросульфатом двойную соль, которая разлагается при дальнейшем нагреве до $330\text{--}380^\circ\text{C}$ с выделением аммиака. Расплавленный гидросульфат натрия возвращается в технологический цикл:



Материальный баланс процесса производства соды с использованием CO_2 из дымовых газов ТЭС и без применения известняка показан в таблице. Видно, что отходом является хлороводород (газ) либо соляная кислота (раствор хлороводорода в воде). Источник хлора (хлорид натрия) выкачивается в виде раствора из скважин. Для замыкания производственного цикла необходимо закачивать раствор соляной кислоты в геологические пласты.

Таблица

Материальный баланс процесса производства соды с использованием CO_2 из дымовых газов ТЭС и без применения известняка (на 1 т кальцинированной соды Na_2CO_3)

Вход, т	Выход, т	
	Продукт	Отход
NaCl , 1,1	Na_2CO_3 , 1,0	HCl , 0,69
H_2O , 0,17		
CO_2 , 0,415		

Предлагаемая перспективная схема производства соды с использованием дымовых газов ТЭС и без использования известняка показана на рис. 1.

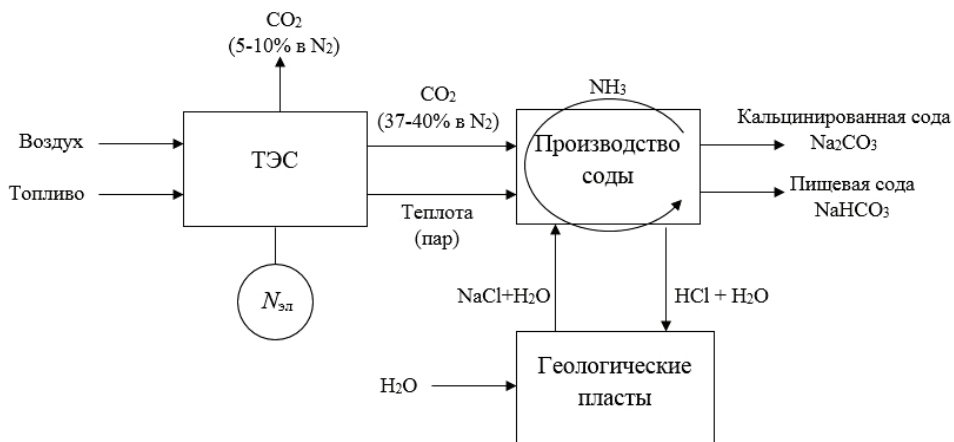


Рис. 1. Принципиальная схема процесса производства соды с использованием дымовых газов ТЭС

Преимуществами предлагаемой технологии производства соды являются отсутствие отходов за счет осуществления замкнутого цикла по хлору, а также реальная возможность практического применения, обусловленная реализацией отдельных технологических процессов в промышленном масштабе. Внедрение предложенной технологии производства соды с использованием CO_2 из дымовых газов ТЭС и без применения известняка на Стерлитамакском содовом заводе позволит решать как региональные, так и глобальные экологические проблемы.

Список источников

1. Putting CO_2 to use [Electronic resource]. Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use> (date of access: 09.12.2020).
2. Carbon capture and utilization technology without carbon-dioxide purification and pressurization: a review on its necessity and available technologies [Electronic resource] / H. Ho [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. Vol. 58, Iss. 21. P. 8941–8954. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01213 (date of access: 09.12.2020).

3. Егоров А. П., Шерешевский А. И., Шманенков И. В. Общая химическая технология неорганических веществ. М. : Химия, 1965. 688 с.

4. Pettinauatal A., Ferrara F., Amorino C. Techno-economic comparison between different technologies for a CCS power generation plant integrated with a sub-bituminous coal mine in Italy [Electronic resource] // Applied Energy. 2012. Vol. 99. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.05.008 (date of access: 09.12.2020).

5. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Л. : Химия, 1974. Ч. 1. 792 с.

УДК 621.311.22

ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ CFD-МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Д. С. Некрасов¹, Н. А. Абаимов²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ mchernix@yandex.ru

Аннотация. В работе проведена валидация CFD-модели псевдоожигенного (кипящего) слоя с использованием экспериментальных данных. Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: псевдоожигенный слой, валидация, моделирование, CFD, OpenFOAM

VALIDATION OF NUMERICAL CFD-MODEL OF TWO-PHASE FLUIDIZED BED OF BULK MATERIAL

D. S. Nekrasov¹, N. A. Abaimov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ mchernix@yandex.ru

Abstract. In this work, the CFD model of fluidized bed was validated using literature experimental data. The CFD simulation results are in satisfactory agreement with the experimental data.

Keywords: fluidized bed, validation, modeling, CFD, OpenFOAM

Тематика снижения выбросов парниковых газов становится все актуальнее благодаря подписанному Россией Парижскому соглашению по климату и ряду других экологических документов. Процесс карбонизации золы тепловых электростанций (ТЭС) в процессе минерализации выбросов CO₂ позволяет улучшать потребительские свойства золы, а также снижать эмиссию CO₂ на 3–5 %, что сопоста-

вимо с повышением коэффициента полезного действия (КПД) ТЭС на 1,5–2 %.

Существуют различные варианты технического оформления процесса карбонизации золы, одним из самых эффективных из них является двухфазный псевдооживленный (кипящий) слой [1]. В настоящее время этот процесс является недостаточно изученным, поэтому для его исследования предлагается применять современные способы моделирования, например метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Цель работы — провести валидацию модели псевдооживленного слоя с использованием экспериментальных данных.

В качестве программы для моделирования выбраны среда OpenFOAM и, в частности, решатель twoPhaseEulerFoam. Сетка — 6 тыс. элементов; экспериментальные данные для валидации — [2], схема установки — на рис. 1.

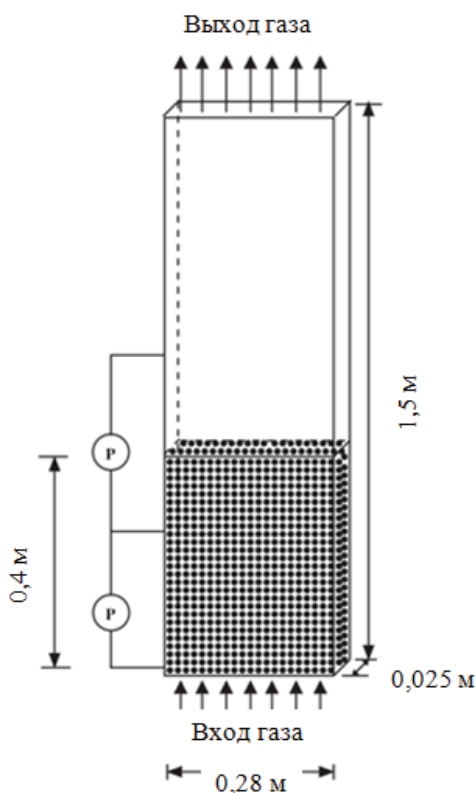


Рис. 1. Схема установки двухфазного псевдооживленного слоя [3]

Параметры работы установки, с которыми были произведены эксперимент [2; 3] и моделирование, приведены в таблице.

Таблица

Параметры работы установки

Параметр работы	Единица измерения	Значение параметра
Диаметр сферических стеклянных частиц	мкм	275
Плотность частиц	кг/м ³	2500
Доля частиц в слое	—	0,6
Максимальная доля частиц	—	0,63
Скорость газа на входе	м/с	0,46
Частота измерений давления	Гц	10
Время проведения замеров	с	20
Высота установки датчиков	м	0,2

Сравнение результатов эксперимента и моделирования приведено на рис. 2.

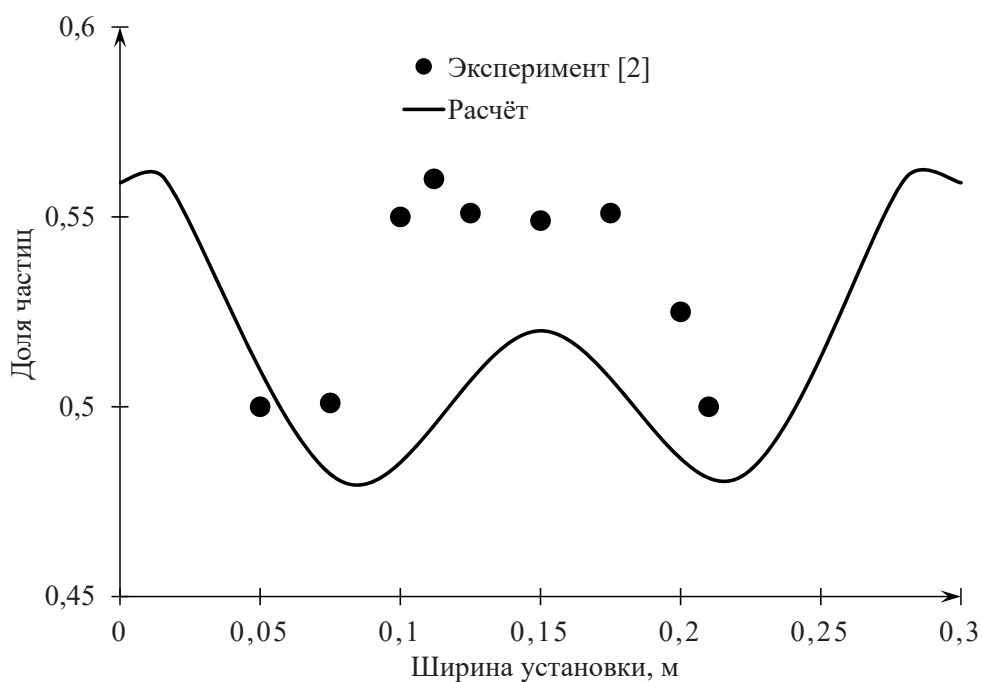


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных [2] с результатами CFD-моделирования

Валидация (сравнение экспериментальных данных с расчетными результатами) проводится на примере осредненного по времени распределения (доли) сферических стеклянных частиц по ширине установки на высоте установки 0,2 м. Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Наблюдается качественное совпадение расчетной и экспериментальной доли частиц в центральной части установки. Максимальные значения доли частиц достигаются около 0,15 м ширины установки. Минимальные же величины расположены симметрично в районе 0,05 и 0,25 м ширины.

Количественное расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными незначительно и его можно объяснить рядом допущений, которые были сделаны в используемой модели псевдооживленного слоя. Среди таких допущений стоит выделить двухмерность моделируемого пространства, а также отказ от использования подмоделей турбулентности.

В ходе дальнейшей работы планируется снизить количество допущений в модели, повысить число расчетных элементов в сетке, проанализировать влияние различных подмоделей на результаты моделирования.

Таким образом, была достигнута цель настоящей работы — проведена валидация модели псевдооживленного слоя с использованием экспериментальных данных, получено удовлетворительное совпадение результатов.

Список источников

1. Simultaneous capture and mineralization of coal combustion flue gas carbon dioxide (CO₂) [Electronic resource] / K.J. Reddy [et al.] // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 4. P. 1574–1583. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.027 (date of access: 14.11.2020).
2. Taghipour F., Ellis N., Wong C. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics [Electronic resource] // *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60, № 24. P. 6857–6867. DOI: 10.1016/j.ces.2005.05.044 (date of access: 14.11.2020).
3. Shi H., Komrakova A., Nikrityuk P. Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments [Electronic resource] // *Powder Technology*. 2019. Vol. 343. P. 479–494. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.043 (date of access: 14.11.2020).

УДК 621.311.22

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПОТОЧНОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ГАЗИФИКАТОРА

Г. А. Нестерова¹, Н. А. Абаимов²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ara-gulyana@yandex.ru

Аннотация. Проведено сравнение результатов CFD-моделирования, получаемых при использовании разных моделей турбулентности и без них, на примере моделирования гидродинамики газификатора. Использование моделей дает результат, отличный от случая без их использования.

Ключевые слова: турбулентность, моделирование, гидродинамика, CFD, OpenFOAM

COMPARISON OF TURBULENCE MODELS ON THE EXAMPLE OF ENTRAINED-FLOW SINGLE-STAGE GASIFIER

G. A. Nesterova¹, N. A. Abaimov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ara-gulyana@yandex.ru

Abstract. Comparison of CFD modeling results obtained using different turbulence models and without them on the example of gasifier hydrodynamics modeling is carried out. Using models gives a different result than the case without using them.

Keywords: turbulence, modeling, hydrodynamics, CFD, OpenFOAM

Введение. Одной из основных мировых экологических проблем является изменение климата и глобальное потепление, возникающее из-за выбросов парниковых газов в результате, в частности, производства тепловой и электрической энергии. Для ее выработки

в основном используется ископаемое топливо, которое приводит к выбросам углекислого газа, доля которого от всех парниковых газов, влияющих на глобальное потепление, составляет 76 % [1].

Одним из решений сокращения выбросов является использование кислородно-топливного цикла Аллама. Основной принцип работы цикла заключается в том, что рабочим телом в нем является углекислый газ, который не выбрасывается в атмосферу, а используется повторно в самом технологическом процессе. Основным узел цикла — газификатор, в котором происходит процесс получения синтез-газа из угля.

Целью работы является сравнение результатов CFD-моделирования, получаемых при использовании разных моделей турбулентности на примере моделирования гидродинамики поточного одноступенчатого газификатора.

Методика моделирования. В качестве инструментария вычислительной гидродинамики (CFD) использована программа OpenFOAM — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования. В качестве решателя использован simpleFoam — решатель для стационарного несжимаемого турбулентного потока. В настоящей работе рассмотрен ламинарный метод моделирования движения потока, а также следующие модели турбулентности: k - ϵ стандартного вида; k - ω SST — модель с модификацией переноса напряжений сдвига. Расчетная сетка состояла из 220 тыс. элементов. На стенках задавалось условие без проскальзывания. Скорость на форсунках равнялась 2,36 м/с и определялась исходя из массового расхода сред и диаметра входных патрубков [2].

Результаты моделирования. В нижней части газификатора находится четыре радиально расположенные горелки, через которые подается среда. За счет организации соударения четырех струй практически в центре газификатора, зона с максимальной температурой располагается в максимальном удалении от стенок во избежание их перегрева и абразивного износа. В работе рассматривалась только гидродинамика газификатора, без химического реагирования и теплообмена. Для анализа структуры движения потока построены поля векторов (рис. 1), полученные с использованием моделей турбулентности (k - ϵ и k - ω SST) и без их использования (ламинарный метод).

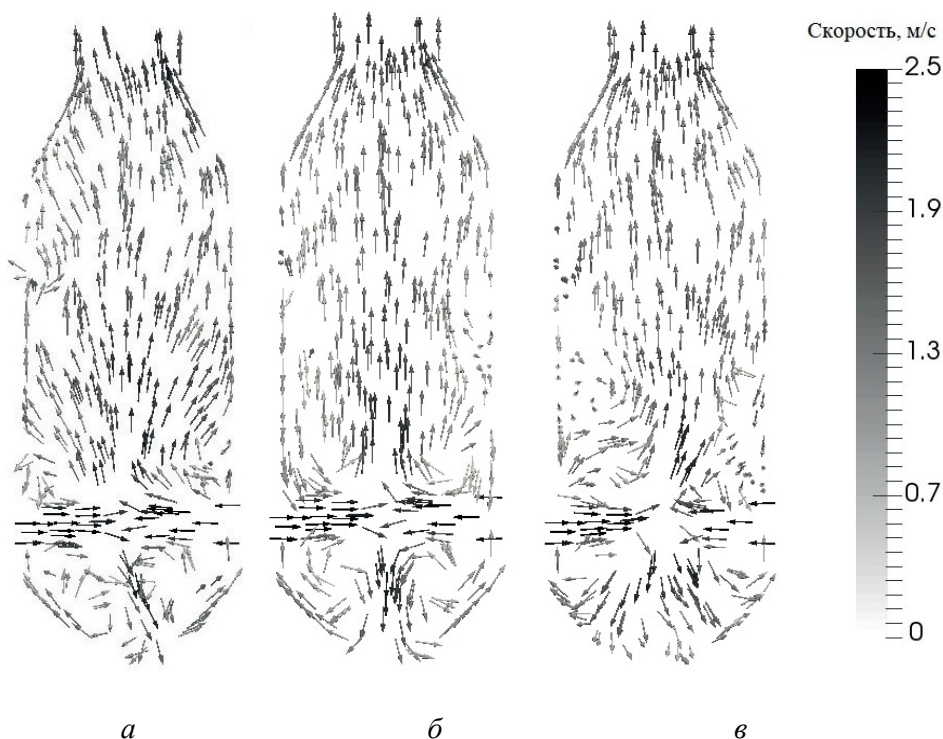


Рис. 1. Поля распределения векторов:
 а — ламинарный; б — $k-\epsilon$; в — $k-\omega$ SST

Полученные поля векторов позволяют оценить и сравнить характер движения среды. Ламинарный метод дает наиболее нестабильную и асимметричную картину. Результаты, полученные с применением двух моделей турбулентности, схожи, однако у результатов модели $k-\epsilon$ наблюдается бóльшая симметрия. Принципиально во всех трех случаях наблюдается схожая картина. При соударении струй на оси газификатора образуется несколько вихрей, часть из них доходит до шлаковой воронки (низ газификатора), а другие направляются к выходу из установки (верх газификатора). Ввиду применения прямооточных горелок, рядом с каждой из них наблюдаются паразитные вихри. Поля векторов позволяют проводить в основном качественное сравнение результатов, однако для количественного сравнения больше подходит анализ распределения скорости среды по высоте (на оси) газификатора (рис. 2).

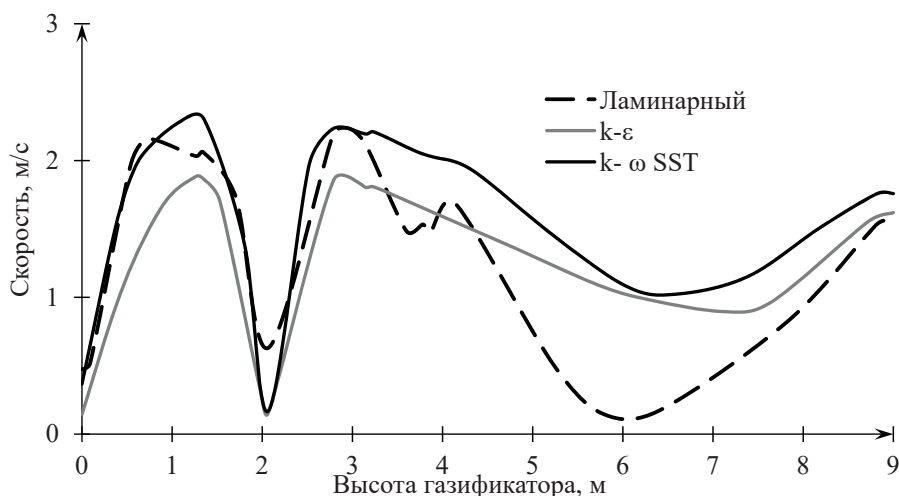


Рис. 2. Скорости на оси газификатора

Анализ распределений скорости на оси газификатора в трех исследуемых случаях позволяет сделать количественное сравнение полученных результатов. Минимальные скорости наблюдаются в районе шлаковой воронки (ввиду образования там застойных вихрей) и около горелок, т. к. струи снижают скорость среды при соударении. В случае без использования моделей турбулентности график скорости на оси газификатора имеет множество перегибов, а на высоте 6 м имеет резкое падение в отличие от двух других случаев.

Заключение. Использование моделей турбулентности замедляет расчет, но дает результат, отличный от случая без их использования, поэтому ими нельзя пренебрегать при дальнейших расчетах процесса газификации угля в такой установке.

Список источников

1. Ziegler C., Morelli V., Fawibe O. Climate change and underserved communities [Electronic resource] // Primary Care: Clinics in Office Practice. 2017. Vol. 44, Iss. 1. P. 171–184. DOI: 10.1016/j.pop.2016.09.017 (date of access: 11.11.2020).
2. Park S. S., Jeong H. J., Hwang J. 3-D CFD Modeling for Parametric Study in a 300-MWe One-Stage Oxygen-Blown Entrained-Bed Coal Gasi-fier [Electronic resource] // Energies. 2015. Vol. 8 (5). P. 4216–4236. DOI: 10.3390/en8054216 (date of access: 11.11.2020).

УДК 621.311.22

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПОТОЧНОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ГАЗИФИКАТОРА

О. В. Седачёва¹, Н. А. Абаимов²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Olga7087@mail.ru

Аннотация. Выполнено моделирование гидродинамики поточного двухступенчатого газификатора с использованием моделей турбулентности k - ε и k - ω SST, а также без моделей турбулентности. Обнаружено, что использование моделей турбулентности необходимо при моделировании газификаторов, несмотря на то что их применение усложняет и замедляет процесс расчета.

Ключевые слова: гидродинамика, моделирование, турбулентность, CFD, OpenFOAM

COMPARISON OF TURBULENCE MODELS ON THE EXAMPLE OF ENTRAINED-FLOW TWO-STAGE GASIFIER

O. V. Sedacheva¹, N. A. Abaimov²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Olga7087@mail.ru

Abstract. Simulation of the hydrodynamics of entrained-flow two-stage gasifier was carried out using the k - ε and k - ω SST turbulence models, as well as without turbulence models. Use of turbulence models is necessary when modeling gasifiers, despite the fact that their use complicates and slows down calculation process.

Keywords: hydrodynamics, modeling, turbulence, CFD, OpenFOAM

Изменение климата является важной проблемой всего мирового сообщества, вследствие повышения концентрации парниковых газов в атмосфере. Наиболее перспективный способ решения этой

проблемы — конверсия угля в парогазовых установках с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ). Их применение позволяет повысить коэффициент полезного действия (КПД) электростанции до 50–55 % и максимально снизить выбросы углекислого газа в атмосферу. Принципиально ПГУ-ВЦГ отличаются от ПГУ, работающих на природном газе, узлом подготовки топливного газа, ключевым элементом которого является газификатор. Одним из наиболее эффективных типов газификаторов считается воздушный поточный двухступенчатый газификатор. В настоящем исследовании моделируется гидродинамика такого газификатора МНІ 2 т/сут [1].

Газификатор (рис. 1) состоит из двух ступеней: камеры сгорания (1 ступень) и камеры газификации (2 ступень), соединённых диффузором. Четыре горелки камеры сгорания расположены тангенциально для закрутки потока, а две горелки камеры газификации установлены радиально.

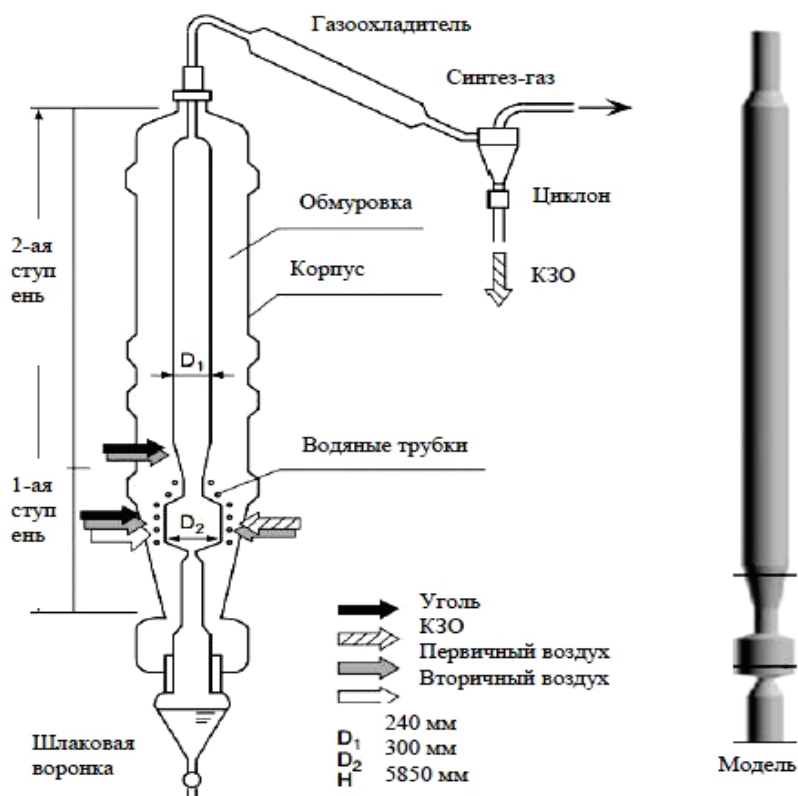


Рис. 1. Конструкция экспериментального газификатора МНІ 2 т/сут. [1]

Основным методом исследования является численное CFD-моделирование. В настоящей работе рассмотрены три варианта моделирования потока:

- 1) без модели турбулентности (ламинарный метод);
- 2) модель турбулентности k - ϵ стандартного вида [2];
- 3) модель турбулентности k - ω Shear Stress Transport (SST, модель с модификацией переноса напряжений сдвига) [3].

Моделирование выполнено в программе OpenFOAM на решателе simpleFoam. Расчетная сетка насчитывала более 32 тыс. элементов, скорость на входе — 2 м/с, на стенках — условия прилипания.

Модель k - ϵ хорошо описывает поведение потока вдали стенки. Модель k - ω позволяет корректнее описать поведение потока вблизи стенки, а модель турбулентности k - ω SST комбинирует в себе две модели: в пристеночной области она работает как k - ω , а вдали от стенок как k - ϵ . Полученные поля векторов приведены на рис. 2.

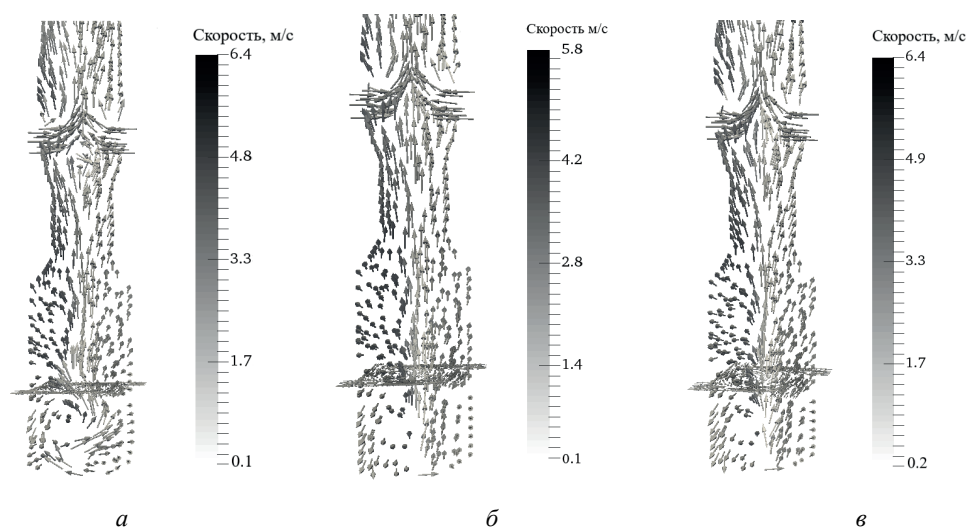


Рис. 2. Поля распределения векторов:

a — ламинарный; $б$ — k - ϵ ; $в$ — k - ω SST

Несмотря на простоту ламинарного метода, расчеты с его использованием демонстрируют нестабильные и асимметричные результаты, что говорит о необходимости использования модели турбулентности. Модели турбулентности k - ϵ и k - ω SST имеют схожие более симметричные и стабильные поля векторов.

На рис. 3 представлено сравнение распределений скорости потока на оси газификатора. Результаты расчетов, проведенных с использованием моделей $k-\epsilon$ и $k-\omega$ SST, достаточно близки друг к другу, что нельзя сказать о случае без использования моделей турбулентности (ламинарный метод). Значение скорости на начальном этапе (до 0,5 м/с) в этом случае значительно выше, чем в других. Минимальные скорости видны в начале графика, что связано с расположением там шлаковой воронки. Пиковые значения скорости располагаются в области горелок первой и второй ступени, а также в районе диффузора (перезиме) между двумя ступенями газификатора.

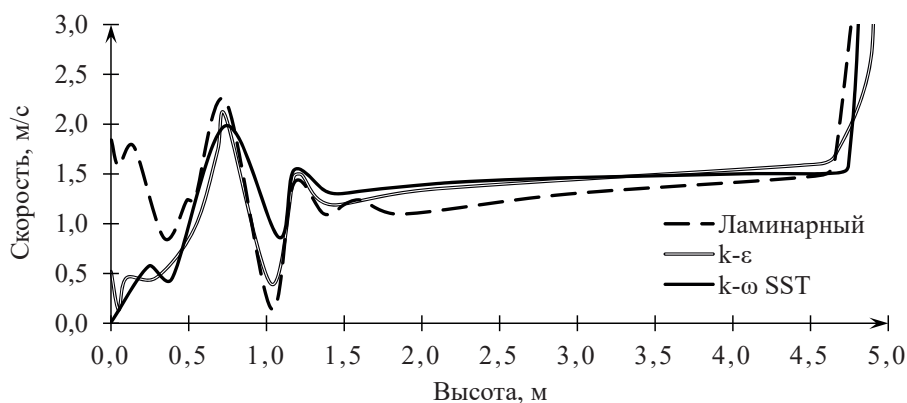


Рис. 3. Скорость на оси газификатора при использовании моделей турбулентности

Различие результатов расчетов с использованием моделей турбулентности и без их использования носит как качественный, так и количественный характер. Соответственно, использование моделей турбулентности необходимо при моделировании поточных двухступенчатых газификаторов, несмотря на то что их применение усложняет и замедляет процесс расчета.

Следующий этап работы заключается в моделировании процесса газификации (не только гидродинамики) с использованием различных моделей турбулентности и их вариации.

Список источников

1. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier [Electronic resource] // Fuel. 2006.

Vol. 85. P. 1935–1943. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.02.002 (date of access: 15.11.2020).

2. Launder B. E., Sharma B. I. Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc [Electronic resource] // Letters in Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 1, № 2. P. 131–137. DOI: 10.1016/0735–1933 (74)90024–4 (date of access: 15.11.2020).

3. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term [Electronic resource] // Journal of Turbomachinery. 2009. Vol. 131. № 4. P. 1–8. DOI: 10.1115/1.3070573 (date of access: 15.11.2020).

УДК 662.613.1

ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЯМОЙ КАРБОНИЗАЦИИ УГОЛЬНОЙ ЗОЛЫ

Н. А. Симанов¹, Г. Е. Масленников², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ nikitajui@mail.ru

Аннотация. В работе выполнен анализ данных, полученных при проведении экспериментов прямой карбонизации угольной золы полусухим и водным методами. Подвергнуты анализу следующие показатели: способность к улавливанию, которая представляет собой количество поглощаемого CO₂ на килограмм летучей золы, и эффективность карбонизации. Приведено сравнение экспериментальных данных, полученных рядом авторов.

Ключевые слова: CCS, CO₂, карбонизация, летучая зола, секвестрация

REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES OF DIRECT CARBONATION OF COAL ASH

N. A. Simanov¹, G. E. Maslennikov², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ nikitajui@mail.ru

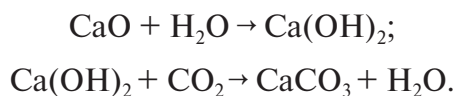
Abstract. The paper analyzes the literature data obtained during experiments on direct carbonation of coal ash by semi-dry and liquid methods. The following indicators were analyzed: the trapping capacity, which is the amount of CO₂ sequestered per kilogram of fly ash, and carbonation efficiency. Experimental data from different authors are compared.

Keywords: CCS, CO₂, carbonation, coal fly ash, sequestration

В последние годы стало очевидно, что антропогенные выбросы парниковых газов, образующиеся в результате сжигания ископаемого топлива, приводят к изменению климата и глобальному потеплению.

Основным направлением борьбы с выбросами парниковых газов является снижение выбросов CO_2 , поскольку именно углекислый газ является главным парниковым газом. Одним из вариантов решения данной проблемы является метод CCS (Carbon Capture and Storage — улавливание и хранение углерода) [1], включающий выделение CO_2 из дымовых газов промышленных и энергетических источников, его транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы. Существуют различные способы отделения CO_2 , среди которых перспективным является минерализация углекислого газа путем карбонизации материалов с повышенным содержанием основных оксидов: горные породы, золошлаковые отходы (ЗШО), отходы строительной индустрии и др.

Основной механизм минерализации CO_2 осуществляется в два этапа — гидратация щелочных оксидов, например оксида кальция, и их карбонизация в соответствии со следующими брутто-реакциями:



В рамках настоящей работы выполнен обзор экспериментальных данных по прямому полусухому и водному методу карбонизации.

При прямом методе оба процесса протекают в одном реакторе, что упрощает реализацию и не требует большого количества химических реагентов. Водная карбонизация обычно считается более предпочтительной [1], поскольку достигаются более высокие скорости реакции по сравнению с полусухим методом. Абсолютно сухой процесс не технологичен, т. к. в этом случае время реакции может достигать десятков лет [2]. Полусухим является процесс с отношением «жидкость — твердое» L/S в диапазоне 0,03–1,0; при $L/S > 1$ процесс называют жидким или суспензионным [1].

Эффективность процесса карбонизации (CE) определяется как отношение количества уловленного CO_2 к теоретической улавливающей способности золы (потенциалу улавливания). Потенциал улавливания может быть рассчитан с помощью стехиометрической формулы Стенуара [2]:

$$\begin{aligned}\text{CO}_2 (\%) &= 0,785 (\% \text{ CaO} - 0,7 \% \text{ SO}_3) + 1,09 \% \text{ MgO} + \\ &+ 0,71 \% \text{ Na}_2\text{O} + 0,468 \% \text{ K}_2\text{O}.\end{aligned}$$

Эффективность карбонизации зависит от множества факторов: давления и температуры процесса, соотношения «жидкость — твердое»,

фракционного состава золы, ее пористости, pH среды, в которой протекают реакции и др.

На основе анализа ряда исследовательских работ [2–9] была построена диаграмма, приведенная на рис. 1, которая отображает зависимость показателя CE от соотношения L/S .

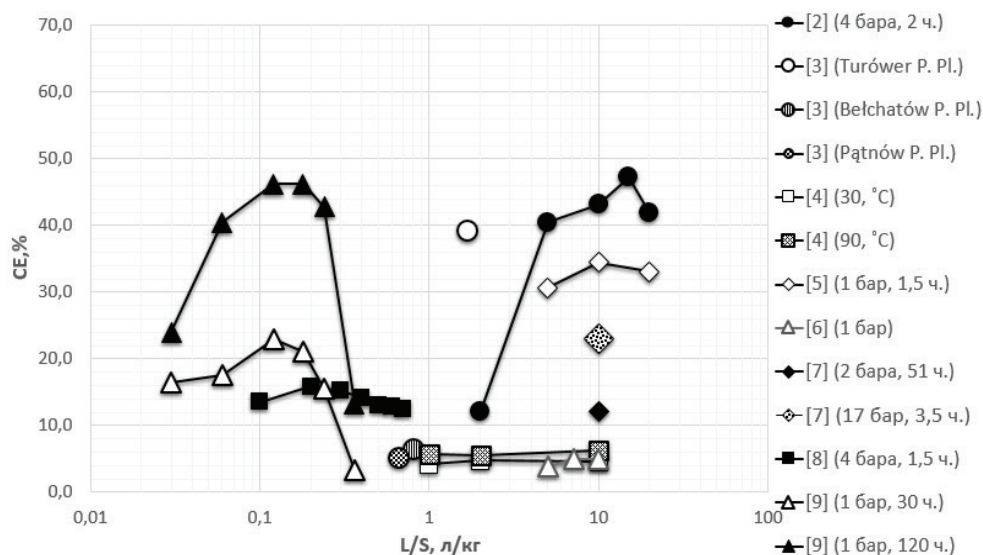


Рис. 1. Зависимость показателя CE от соотношения «жидкость — твердое» (L/S)

В результате можно обнаружить наличие двух максимумов, приходящихся на полусухую и суспензионную области. С одной стороны, те, кто начинал исследование от $L/S = 0$, доходили до максимума эффективности карбонизации при $L/S = 0,2–0,4$ и с затуханием процесса завершали исследование. С другой стороны, те, кто начинал исследование при больших $L/S > 20$, находили максимум в области $L/S = 15–20$ и также прекращали исследование. Можно сделать вывод, что сравнение эффективности карбонизации носит условный характер, а общая картина процессов карбонизации в диапазоне влагосодержаний L/S от 0 до 20–50 отсутствует.

Список источников

1. Applications of fly ash for CO_2 capture, utilization, and storage / A. Dindi [et al.] // Journal of CO_2 Utilization. 2019. Vol. 29. P. 82–102.

2. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. P. 4173–4182.
3. Estimation of CO₂ sequestration potential via mineral carbonation in fly ash from lignite combustion in Poland / A. Uliasz-Bocheńczyk [et al.] // *Energy Procedia*. 2009. Vol. 1, iss. 1. P. 4873–4879.
4. Comparison of CO₂ capture by ex-situ accelerated carbonation and in in-situ naturally weathered coal fly ash / G. N. Muriithi [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 127. P. 212–220.
5. CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal / L. Ji [et al.] // *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 156 P. 429–437.
6. Evaluation of factors affecting mineral carbonation of CO₂ using coal fly ash in aqueous solutions under ambient conditions / H. Y. Jo [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 183. P. 77–87.
7. Rendeck E., Ducom G., Germain P. Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 128, iss. 1. P. 73–79.
8. Ukwattage N. L., Ranjith P. G., Wang S. H. Investigation of the potential of coal combustion fly ash for mineral sequestration of CO₂ by accelerated carbonation // *Energy*. 2013. Vol. 52. P. 230–236.
9. Carbonation of lignite fly ash at ambient T and P in a semi-dry reaction system for CO₂ sequestration / M. Bauer [et al.] // *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26, iss. 8. P. 1502–1512.

УДК 662.613.1

ПАРАМЕТРЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ УГОЛЬНОЙ ЗОЛЫ

Н. А. Симанов¹, Г. Е. Масленников², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ nikitajui@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе приводится сводная таблица параметров проведения экспериментов по прямой карбонизации золы. Также даются следующие показатели: способность к улавливанию, которая представляет собой количество поглощаемого CO₂ на килограмм летучей золы, и эффективность карбонизации. Таблица построена на основе обзора девяти зарубежных работ.

Ключевые слова: CCS, CO₂, карбонизация, летучая зола, секвестрация

PARAMETERS AND INDICES OF THE COAL ASH CARBONIZATION PROCESS

N. A. Simanov¹, G. E. Maslennikov², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ nikitajui@mail.ru

Abstract. In this paper, a summary table of the parameters of experiments on direct ash carbonization. The following metrics are also given: the capture capacity, which is the amount of CO₂ consumed per kilogram of fly ash, and the carbonation efficiency. The table is based on a review of 9 sources.

Keywords: CCS, CO₂, carbonation, coal fly ash, sequestration

Комплексный процесс карбонизации основных компонентов зол тепловых электростанций (ТЭС) в процессе минерализации выбросов CO₂ позволяет повышать потребительские свойства золошлаков при снижении эмиссии CO₂ на 3–5 %, что эквивалентно повышению коэффициента полезного действия (КПД) ТЭС на 1,5–2 %. Интен-

сивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР, R&D) по новому направлению начинают проводиться в Китае, Индии, Австралии, США и странах ЕС.

В рамках настоящей работы выполнен обзор экспериментальных исследований по прямому методу карбонизации, когда все процессы протекают в одном объеме, также приводятся данные по влиянию параметров процесса на его эффективность.

Химический процесс карбонизации может быть представлен брутто-реакцией основных оксидов с CO_2 с образованием карбонатов [1]:



Такая реакция является экзотермической. Для получения высокой степени карбонизации необходимы высокие давления и концентрации CO_2 при низких температурах. Для достижения высокой эффективности карбонизации (СЕ) необходимо применение низкосиликатного высокодисперсного сырья и высоких температур [2]. Кроме того, можно обнаружить наличие двух максимумов СЕ, приходящихся на полусухую и суспензионную области. Основные показатели и параметры прямой карбонизации приведены в таблице.

Таблица

Показатели и параметры процесса карбонизации угольной золы

Источ- ник	Состав, %	P , бар	T , °C	t , ч	L/S , л/кг	Погл., кг/кг	Пот-ал, кг/кг	СЕ, %	
[2]	SiO ₂ —41,8; Fe ₂ O ₃ —9,16; Al ₂ O ₃ —18,39; SO ₃ —3,29; CaO — 6,74; MgO — 2,22; Na ₂ O — 1,38; K ₂ O — 1,13; TiO ₂ —1,03; P ₂ O ₅ —0,41; LOI (потери) — 0,38; следы — 0,38	10	30	1,00	0,00	0,0260	0,074	35,50	
		4		22,00	2,00	0,0090		12,10	
					5,00	0,0300		40,50	
					10,00	0,0320		43,20	
					15,00	0,0350		47,20	
					20,00	0,0310		41,80	
[3]	SiO ₂ —37,93; Fe ₂ O ₃ —4,5; Al ₂ O ₃ —27,88; CaO —15,72; MgO — 1,91; SO ₃ —4,74; CaO _{св} — 4,91; W — 0,1; ρ — 2450 кг/м ³	—	—	24,00	1,60	0,0463	0,118	39,24	
			240,00	0,0546		46,27			
			579,00	0,0616		52,20			
		SiO ₂ —45,75; Fe ₂ O ₃ —3,99; Al ₂ O ₃ —20,05; CaO — 21,6; MgO — 0,78; SO ₃ —2,75; CaO _{св} — 1,10; W — 0,4; ρ — 2290 кг/м ³	—	—	24,00	00,67	0,0105	0,163	6,44
					240,00		0,0158		9,69
					745,00		0,0298		18,28

Продолжение табл.

Источ- ник	Состав, %	P , бар	T , °C	t , ч	L/S , л/кг	Погл., кг/кг	Пот-ал, кг/кг	СЕ, %		
[3]	SiO ₂ —41,55; Fe ₂ O ₃ —4,49; Al ₂ O ₃ —4,74; CaO — 29,28; MgO — 4,47; SO ₃ —6,89; CaO _{св} — 7,08; W — 0,3; ρ — 2650 кг/м ³	6—10	25— 37	24,00	0,67	0,0124	0,241	5,15		
				240,00		0,0226		9,38		
				520,00		0,0315		13,07		
[4]	SiO ₂ —51,23; Fe ₂ O ₃ —2,43; Al ₂ O ₃ —26,0; CaO — 9,2; MgO — 2,44; SO ₃ —0,36; Na ₂ O — 0,46; K ₂ O — 0,79	10	30	—	1,00	—	0,103	4,18		
					2,00			4,72		
					10,00			4,54		
			90	—	1,00	—		5,63		
					2,00			5,61		
					10,00			6,23		
[5]	SiO ₂ —41,83; Fe ₂ O ₃ —9,16; Al ₂ O ₃ —18,39; CaO — 6,74; MgO — 2,22; SO ₃ —3,29; Na ₂ O — 1,38; K ₂ O — 1,13	1	80	1,50	20,00	—	0,074	33,12		
			60		10,00			33,53		
			70		5,00			30,67		
			80		10,00			34,25		
			33,88							
			33,51							
90	34,48									
	[6]	SiO ₂ —50,3; Fe ₂ O ₃ —7,8; Al ₂ O ₃ —21,8; CaO — 7,2; MgO — 1,5; K ₂ O — 0,3	1	25	—	10,00	—	0,073	4,96	
						7,14			5,00	5,00
5,00						3,92				
[7]	SiO ₂ —49,3; Fe ₂ O ₃ —7,6; Al ₂ O ₃ —7,5; CaO — 16,3; MgO — 2,6; MnO — 0,1; Na ₂ O — 6,0; K ₂ O — 1,1; TiO ₂ —0,6; P ₂ O ₅ —1,2; TOC — 1,5; Stot — 0,3; Cl — 0,4; W — 0,15	2	25	51,00	10,00	0,0245	0,204	12,00		
		17	25	3,50	10,00	0,0470	0,204	23,00		
[8]	CaO — 35,2; Fe ₂ O ₃ —3,09; SiO ₂ —11,4; MgO — 7,54; SO ₃ —11,4; Al ₂ O ₃ —3,2; ρ — 1,875 г/см ³	4	40	1,50	0,20	0,0470	0,296	15,90		
					0,10	0,0400		13,50		
					0,30	0,0450		15,20		
					0,40	0,0420		14,20		
					0,50	0,0390		13,00		
					0,60	0,0380		12,80		
					0,70	0,0370		12,50		

Окончание табл.

Источ- ник	Состав, %	P , бар	T , °C	t , ч	L/S , л/кг	Погл., кг/кг	Пот-ал, кг/кг	СЕ, %
[9]	C — 0,018; Si — 0,06; Fe — 0,064; Ti — 0,004; Al — 0,019; Mn — 0,002; Mg — 0,165; Ca — 0,51; Na — 0,024; K — 0,01; P — 0,001; S — 0,123	1	25– 45– 80	030,00	0,03	0,0660	0,400	16,50
					0,06	0,0700		17,50
					0,12	0,0920		23,00
					0,18	0,0840		21,00
					0,24	0,0620		15,50
					0,36	0,0130		3,30
				1120,00	0,03	0,0960		24,00
					0,06	0,1620		40,50
					0,12	0,1850		46,30
					0,18	0,1850		46,30
					0,24	0,1710		42,80
					0,36	0,0530		13,30
[10]	SiO ₂ –32,69; Fe ₂ O ₃ –7,73; Al ₂ O ₃ –10,49; SO ₃ –2,53; CaO — 38,28; MgO — 2,27; Na ₂ O — 1,12; K ₂ O — 0,99; TiO ₂ –0,58; Cl — 1,04; SO ₄ –2,21	2,5	25	0,87	0,00	0,0230	0,289	8,00

Можно сделать вывод, что известные данные носят фрагментарный характер и описывают реализацию частных случаев с разбросом, в конечном результате достигающем 1–2 порядков. Выявление лимитирующей стадии процесса с оптимизацией параметров для приближения фактической эффективности карбонизации золы к теоретической является актуальной задачей.

Список источников

1. Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage / A. Dindi [et al.] // Journal of CO₂ Utilization. 2019. Vol. 29. P. 82–102.
2. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. P. 4173–4182.
3. Estimation of CO₂ sequestration potential via mineral carbonation in fly ash from lignite combustion in Poland / A. Uliasz-Bocheńczyk [et al.] // Energy Procedia. 2009. Vol. 1, iss. 1. P. 4873–4879.

4. Comparison of CO₂ capture by ex-situ accelerated carbonation and in in-situ naturally weathered coal fly ash / G. N. Muriithi [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 127. P. 212–220.
5. CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal / L. Ji [et al.] // *Fuel Proces. Technol.* 2017. Vol. 156 P. 429–437.
6. Evaluation of factors affecting mineral carbonation of CO₂ using coal fly ash in aqueous solutions under ambient conditions / H. Y. Jo [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 183. P. 77–87.
7. Rendek E., Ducom G., Germain P. Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 128, iss. 1. P. 73–79.
8. Ukwattage N. L., Ranjith P. G., Wang S. H. Investigation of the potential of coal combustion fly ash for mineral sequestration of CO₂ by accelerated carbonation // *Energy*. 2013. Vol. 52. P. 230–236.
9. Carbonation of lignite fly ash at ambient T and P in a semi-dry reaction system for CO₂ sequestration / M. Bauer [et al.] // *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26, iss. 8. P. 1502–1512.
10. Mazzella A., Errico M., Spiga D. CO₂ uptake capacity of coal fly ash: Influence of pressure and temperature on direct gas-solid carbonation // *J. Environ. Chem. Eng.* 2016. Vol. 4, Iss. 4. P. 4120–4128.

УДК 620.178.16;66.045.12

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ТРУБЧАТОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

И. Д. Суворин¹, П. В. Осипов², В. А. Микула³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Suvorin.ig@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрено, как различные факторы влияют на эрозионный износ трубчатого воздухоподогревателя энергетического котла. Определены наиболее уязвимые для эрозии точки. Предложен метод расчета воздухоподогревателя с помощью математического моделирования.

Ключевые слова: абразивный износ, воздухоподогреватель, летучая зола, эрозионный износ, CFD

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING EROSION WEAR OF A PIPE HEATER OF A POWER BOILER

I. D. Suvorin¹, P. V. Osipov², V. A. Mikula³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Suvorin.ig@yandex.ru

Abstract. The work considers how various factors affect the erosive wear of a tubular air heater of a power boiler. The points most vulnerable to erosion have been determined. A method for calculating an air heater using mathematical modeling is proposed.

Keywords: abrasive wear, CFD, erosion wear, air heater, fly ash

Эрозия — это процесс, при котором материал удаляется с поверхности в результате воздействия потока абразивных частиц, вследствие чего поверхность истирается и толщина стенок становится меньше. В таблице приводится анализ влияния основных параметров на эрозионный износ.

Таблица

Влияние основных параметров на эрозионный износ

Фактор, влияющий на эрозионный износ	Параметры фактора	Характер зависимости износа от данного фактора
Длительность взаимодействия	Начальный период (до 40 мин.)	Линейно-возрастающий
	С течением времени (~ > 40 мин.)	Нелинейный характер, шероховатость, развиваемая на поверхности за счет эрозии, выходит на постоянный уровень
Форма частиц [1]	Острые угловатые частицы	Высокий уровень удельной массовой эрозии (~в 4 раза больше, чем у сферических)
	Сферические частицы	Минимальный уровень удельной массовой эрозии
Размер частиц ($d_{\text{ч}}$) [2, 3]	Несколько микрометров	Не разрушают материал поверхности из-за низкой кинетической энергии
	От ~10 мкм до 100–150 мкм	Практически прямая пропорциональность эрозии от $d_{\text{ч}}$
	Более 100–150 мкм	Эффект насыщения, величина эрозии не изменяется
	Любой диаметр для стекла	Линейная зависимость величины эрозии
Материал частиц [4]	Твердость	Возрастание эрозии до 700 ед. твердости по Викерсу. После 700 ед — не изменяется. Температура, термообработка влияют на изменение твердости, иногда — на размер частиц
	Плотность	Чем выше плотность, тем выше кинетическая энергия, следовательно, выше эрозия

Окончание табл.

Фактор, влияющий на эрозионный износ	Параметры фактора	Характер зависимости износа от данного фактора
Свойства материала стенки [5]	Пластичные материалы, используемые в твердотопливной энергетике	Чем выше твердость, тем меньше эрозионный износ
Скорость частиц [6]	Эрозия начинается при критической скорости частиц и возрастает с ростом скорости. Зависимость эрозии от скорости имеет вид: $E \sim U_p^n$, где E — скорость эрозии; U_p — скорость частицы в момент удара; n — для пластичных материалов от 2,3 до 2,7; для хрупких — от 2 до 4	
Угол удара частиц [6]	Для пластичных материалов	Зависимость эрозии от угла имеет максимум при 15° , минимум — при углах близких к прямому
	Для хрупких материалов	Скорость эрозии возрастает вместе с увеличением угла падения и достигает максимума при прямом угле
Температура	Зависимость скорости эрозии от температуры неоднозначна и зависит в основном от свойств и материала частиц	

Высокотемпературная эрозия-коррозия труб теплообменников и других конструкционных элементов признана основной причиной простоев на электростанциях. Затраты на техническое обслуживание и замену сломанных труб в тех же установках также очень высоки.

Существующие методики оценки эрозионного износа, применяемые при разработке котельных агрегатов [7], пригодны только для расчета стандартных конструкций теплообменных поверхностей.

Из изложенного выше следует, что исследование эрозионного износа поверхностей нагрева энергетического оборудования является актуальной задачей.

Ожидается, что наиболее уязвимыми участками трубчатого воздухоподогревателя будут входной участок, в котором происходит сужение и последующее расширение потока, а также перегородка (рис. 1) [8].

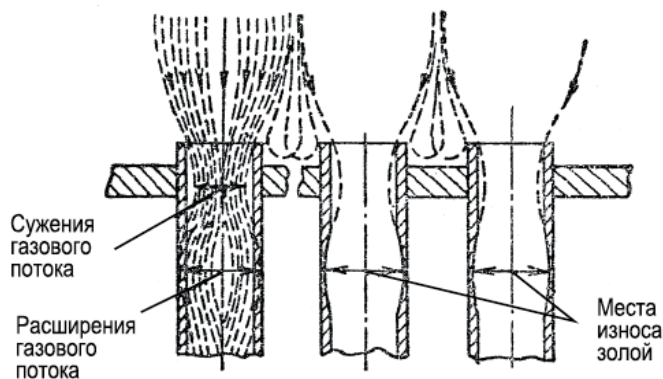


Рис. 1. Наиболее уязвимые участки трубчатого воздухоподогревателя

Планируется выполнить CFD-моделирование эрозионного износа базовой конструкции трубчатого воздухоподогревателя и провести дальнейший анализ на предмет уменьшения эрозионного износа.

Список источников

1. Salik J., Buckey D., Brainard W.A. The effect of mechanical surface and heat treatments on erosion resistance of 6061 aluminum alloy // *Wear*. 1981. Vol. 65, iss. 3. P. 351–358.
2. Tilly G. P. A two stage mechanism of ductile erosion // *Wear*. 1973. Vol. 23, iss. 1. P. 87–96.
3. Tilly G. P., Sage W. The interaction of particle and material behaviour in erosion processes // *Wear*. 1970. Vol. 16, iss. 6. P. 447–465.
4. Levy A. V., Chik P. The effect of erodent composition and shape on the erosion of steel // *Wear*. 1983. Vol. 89 (2). P. 151–162.
5. Modeling solid-particle erosion of ductile alloys / B. F. Levin [et al.] // *Metall. Mater. Trans. A*. 1999. Vol. 30 (7). P. 1763–1774.
6. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi [et al.] // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2014. Vol. 21. P. 850–873.
7. Вдовенко М. И., Баяхунов А. Я., Чурсина Н. Я. Загрязнение и износ поверхностей нагрева парогенераторов. Алма-Ата : Наука, 1978. 133 с.
8. Жихар Г. И. Котельные установки тепловых электростанций. Минск : Вышэйшая школа, 2015. 522 с.

УДК 662.613.1

ТЕХНОЛОГИЯ КАРБОНИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВ КАК СПОСОБ СЕКВЕСТРАЦИИ CO₂

Е. А. Ткаченко¹, Т. Ф. Богатова², М. Б. Чернова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ 07katya007@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы секвестрации вредных выбросов. Проанализированы перспективы развития технологии карбонизации минералов для улавливания и связывания углекислого газа (CO₂). В статье описаны преимущества такого направления. Рассмотрены наиболее перспективные производства с точки зрения карбонизации отходов в результате поглощения ими CO₂.

Ключевые слова: минеральная карбонизация, улавливание и связывание CO₂

TECHNOLOGY OF PRODUCTION WASTE CARBONIZATION AS A METHOD FOR CO₂ SEQUESTRATION

E. A. Tkachenko¹, T. F. Bogatova², M. B. Chernova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ 07katya007@mail.ru

Abstract. The problems of sequestration of harmful emissions are considered. The prospects for the development of mineral carbonization technology for carbon dioxide (CO₂) capture and sequestration are analyzed. The article describes the advantages of this direction. The most promising industries are considered from the point of view of waste carbonization as a result of CO₂ absorption by them.

Keywords: mineral carbonation, CO₂ capture and sequestration

Улавливание и связывание углекислого газа (CO₂) включает ряд технологий, которые потенциально могут улавливать миллиарды

тонн CO_2 в год. Одной из перспективных технологий является карбонизация — процесс, в котором CO_2 химически реагирует с материалами, содержащими Ca и (или) Mg с образованием стабильных карбонатов.

Теоретическое максимальное поглощение углекислого газа t_{CO_2} (в мас. %) может быть рассчитано с использованием модифицированной формулы Steinour [1]:

$$t_{\text{CO}_2 \text{ поглощ}} = 0,785 \cdot (\% \text{CaO} - 0,53 \cdot \% \text{CaCO}_3 - 0,7 \cdot \% \text{SO}_3) + \\ + 1,091 \cdot \% \text{MgO} + 0,71 \cdot \% \text{Na}_2\text{O} + 0,468 \cdot (\% \text{K}_2\text{O} - 0,632 \cdot \% \text{KCl}).$$

Сырьевым источником, содержащим CaO и (или) MgO, могут быть твердые отходы крупномасштабных промышленных процессов, таких как тепловые электростанции, работающие на угле или сланце, установки для сжигания твердых отходов, цементные заводы, сталелитейная и бумажная промышленность. Такой подход имеет ряд преимуществ:

- 1) Ca-Mg-содержащие отходы и выбросы CO_2 образуются в одном и том же или связанных технологических процессах;
- 2) эти отходы химически менее стабильны, чем геологические породы, поэтому требуют более низкой степени предварительной обработки и менее энергоемких рабочих условий для реализации процесса карбонизации;
- 3) опасные отходы могут быть переклассифицированы посредством нейтрализации pH и минерального преобразования и повторно использоваться в других отраслях промышленности.

Далее рассматриваются наиболее перспективные производства с точки зрения карбонизации отходов в результате поглощения ими CO_2 .

Сталеплавильные процессы производят значительное количество CO_2 (0,28–1 т CO_2 /т стали), что составляет 6–7 % глобальных выбросов CO_2 [2]. Кроме того, в глобальном масштабе эти процессы производят около 315–420 Мт шлака в год. Шлаки образуются в результате взаимодействия между технологическими добавками (в первую очередь кремнеземом) и известью на различных стадиях производства стали и состоят в основном из Ca-, Mg-, Al-силикатов и оксидов в различных комбинациях. Использование повышенных давлений и температур, добавок и ультразвуковой обработки значительно улучшает кинетику карбонизации, но также увеличивает затраты. Так, использование раствора HNO_3 привело к быстрому извлечению Ca и Mg из шлаков

конвертерных и электродуговых печей с улавливающей способностью 0,26–0,38 т CO_2 на т шлака.

Установки для сжигания бытовых отходов производят как твердые остатки, так CO_2 . При этом содержание Са и Mg в этих отходах недостаточно для значительной секвестрации CO_2 , и метод карбонизации минералов в основном применяется для достижения химически стабильной структуры с улучшенными характеристиками для различных применений (например, вторичный строительный материал в дорожных основаниях).

Угольные электростанции обеспечивают около 40 % мировой электроэнергии, генерируя ежегодно 12 тыс. Мт CO_2 и 600 Мт летучей золы [3]. Основными компонентами летучей золы каменного угля являются SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO (1–3 %) и CaO (5–10 %) и различное количество несгоревшего углерода. Максимальный потенциал связывания CO_2 каменноугольной золы относительно низок — 9 мас. %, но он может достигать 43–49 % для богатого кальцием бурого угля или сланцевой золы. Предварительный экономический анализ процесса показал, что улавливание 90 % CO_2 на электростанции мощностью 532 МВт будет стоить около 11–21 долл. за тонну CO_2 при улавливающей способности 0,1–0,2 т CO_2 на тонну золы.

Цементная промышленность производит 0,15–0,20 т цементной пыли на тонну цемента (мировое производство 2,8 Гт) и 5 % мировых выбросов CO_2 [2]. Цементная пыль характеризуется как потенциально опасные отходы из-за своей едкой природы и сбрасывается на соответствующие свалки или склады. Типичная пыль содержит 38–48 % CaO и 1,5–2,1 % MgO, но значительное количество ее уже карбонизировано и содержит 46–57 % CaCO_3 . Цементная байпасная пыль, которая удаляется после обжига печи, имеет гораздо более низкое содержание карбонатов и, следовательно, гораздо более высокий потенциал улавливания CO_2 (0,5 т CO_2 на т пыли).

Добывающая промышленность в процессе разработки месторождений асбеста, меди, никеля, платины и др., образуют хвосты, пригодные для карбонизации минералов. Помимо связывания CO_2 , обработка карбонизацией также улучшает свойства отходов, особенно в случае хвостов асбеста и красного шлама, обеспечивая более безопасное захоронение или повторное использование.

Целлюлозно-бумажное производство приводит к образованию нескольких типов щелочных отходов, которые обычно содержат

45–82 % свободного CaO , поэтому являются подходящими сорбентами для карбонизации минералов [2]. Целлюлозные заводы также производят CO_2 , который можно использовать для карбонизации отходов. Произведенный CaCO_3 можно использовать в целлюлозно-бумажной промышленности или продавать как побочный продукт с добавленной стоимостью. Интенсивность карбонизации составляет 0,16–0,27 т CO_2 /т отходов при 20–30 °С и 2–10 атм в течение 2–72 ч.

Список источников

1. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO_2 / A. Sanna [et al.] // Chem Soc Rev. 2014. № 43. P. 8049–8080.
2. The CO_2 -binding by Ca-Mg-silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag / M. Uibu [et al.] // Energy Procedia. 2011. Vol. 4. P. 925–932.
3. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes / E. R. Bobicki [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. 2012. Vol. 38, iss. 2. P. 302–320.

УДК 662.613.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ НА ПРИБОРЕ ТГА

Е. А. Ткаченко¹, П. В. Осипов², Т. Ф. Богатова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ 07katya007@mail.ru

Аннотация. В настоящее время идет развитие направления карбонизации минералов для улавливания и связывания углекислого газа (CO_2). Объектом исследования является CaO , по физико-химическим показателям соответствующий ГОСТ 8677–76. Методом термогравиметрического анализа проведены экспериментальные исследования процесса взаимодействия образца CaO с характерными газовыми компонентами уходящих газов тепловых электростанций (ТЭС). Получены данные по температурным режимам взаимодействия CaO с указанными газами-реагентами.

Ключевые слова: минеральная карбонизация, улавливание CO_2 , термогравиметрический анализ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF CALCIUM OXIDE CARBONIZATION ON A TGA DEVICE

E. A. Tkachenko¹, P. V. Osipov², T. F. Bogatova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ 07katya007@mail.ru

Abstract. Currently, the development of the direction of carbonization of minerals is under way to capture and fix carbon dioxide (CO_2). The object of the study is CaO in terms of physicochemical parameters corresponding to GOST 8677–76. The method of thermogravimetric analysis was used to experimentally study the interaction of the CaO sample with the characteristic gas components of the thermal power plant exhaust gases. Data were obtained on the temperature regimes of interaction of CaO with the indicated reagent gases.

Keywords: mineral carbonation, CO_2 capture, thermogravimetric analysis

Методы улавливания, использования и хранения углерода (CCUS) включают ряд технологий, которые потенциально могут значительно снизить выбросы CO_2 от энергетических объектов. Одним из технологических решений является связывание CO_2 посредством образования относительно стабильных и доброкачественных карбонатных минералов. Богатые кальцием промышленные твердые отходы и остатки представляют собой потенциальный источник высокореакционных оксидов без необходимости предварительной обработки [1].

Карбонизация минералов — это постоянный и безопасный способ хранения CO_2 , который не вызывает потенциальных опасений по поводу долгосрочного мониторинга и вопросов ответственности, таких как геологическое хранение. Карбонизация — многообещающий вариант с точки зрения имеющихся ресурсов и повышенной безопасности, но технология еще находится в зачаточном состоянии и требует проведения дальнейших исследований [2].

Для изучения комплексного процесса карбонизации свободных оксидов кальция из минеральной части зол тепловых электростанций (ТЭС) на начальном этапе были проведены экспериментальные исследования взаимодействия чистого для анализа CaO с различными газами-реагентами (H_2O , CO_2 , N_2). Эксперименты проводились в анализаторе NETZSCH STA 449 F3 методом термогравиметрического анализа (ТГА) с целью выявить характерные температурные диапазоны. Параметры экспериментов приведены в таблице.

Таблица

Параметры эксперимента

Номер опыта	Масса навески, мг	Состав дутья, % об.	Температурная программа	Скорость нагрева, К/мин
1	30	50 % N_2 + 50 % H_2O	Нагрев до 1000 °С	20
2	30	50 % N_2 + 50 % H_2O	Нагрев до 650 °С	20
		50 % CO_2 + 50 % H_2O	Нагрев от 650 до 1000 °С	

Во время разогрева печи весами анализатора фиксировалось изменение массы навески, масс-спектрометром записывался газовый состав уходящих продуктов.

Результаты опыта № 1 представлены на рис. 1. Процесс гидратации образца проходил в диапазоне 217–465 °С, при дальнейшем нагреве наблюдается обратный процесс с резким снижением массы. Дальнейшее сниже-

ние массы в диапазоне температур 522–622 °С и выделение CO_2 связаны с разложением примесей, содержащихся в исходном образце.

В опыте № 2 температурная программа не отличалась, но при достижении 650 °С происходило переключение состава дутья с N_2 на CO_2 . Как видно из результатов опыта № 2 (рис. 2), до переключения состава дутья процесс изменения массы аналогичен опыту № 1. После переключения газов с N_2 на CO_2 начинается резкий рост массы за счет процесс карбонизации CaO с образованием карбоната кальция. При достижении температуры 825 °С происходит разложение карбонатов.

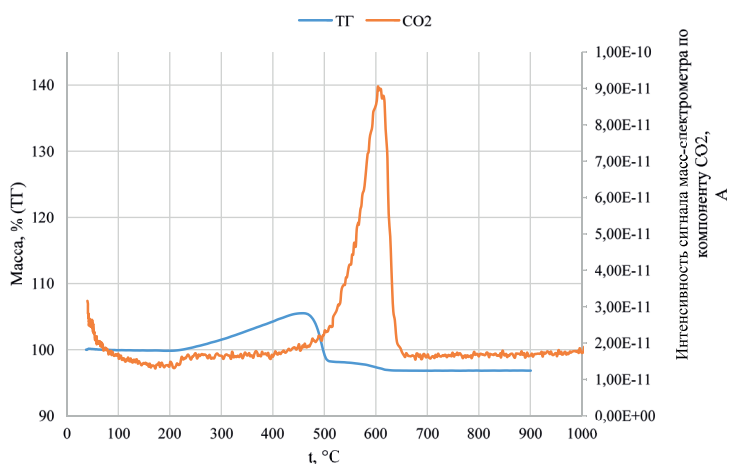


Рис. 1. Данные термического и газового анализа для опыта № 1

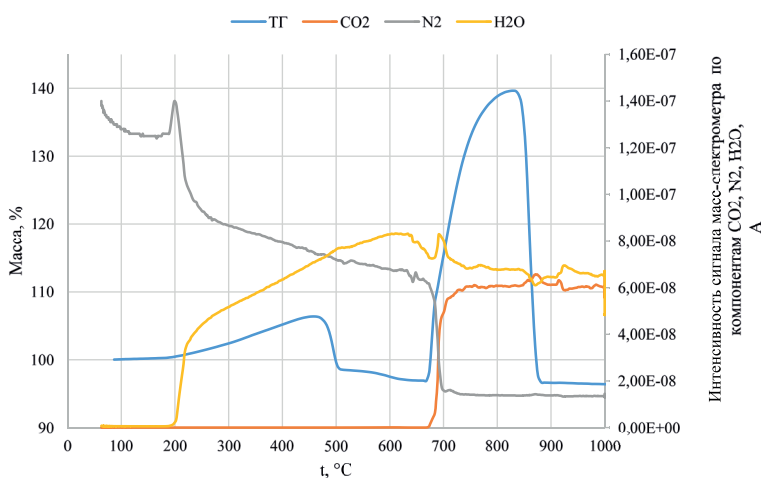


Рис. 2. Данные термического и газового анализа для опыта № 2

В результате исследования получены характерные температурные режимы взаимодействия СаО в среде пара, азота и углекислого газа. Данные могут быть использованы для оценки фактической эффективности карбонизации основных компонентов зол ТЭС в ходе минерализации CO_2 . Сочетания процессов получения свободных оксидов кальция в минеральной части сжигаемого твердого топлива и химического насыщения их CO_2 из продуктов сгорания позволяет организовать малоотходный процесс на тепловой станции.

Список источников

1. Mineral carbonation for carbon sequestration in cement kiln dust from waste piles [Electronic resource] / D. N. Huntzinger [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 168, iss. 1. P. 31–37. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.122 (date of access: 10.11.2020).
2. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO_2 [Electronic resource] / A. Sanna [et al.] // Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 46, iss. 6. P. 8049–8080. DOI: 10.1039/c4cs00035h (date of access: 10.11.2020).

УДК 628.475

ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПИРОЛИЗНОГО ОСТАТКА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

М. М. Чижикова¹, О. Б. Колибаба²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

² tevp@tvp.ispu.ru

Аннотация. В работе рассматривается теплотехнология получения керамического материала. В качестве добавки использовался твердый остаток пиролиза коммунальных отходов. Предлагаемая теплотехнология позволяет получить строительные керамические изделия, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 530–2012.

Ключевые слова: теплотехнология, твердые коммунальные отходы, керамическая масса, легкоплавкая глина, твердый остаток пиролиза

HEAT TECHNOLOGY OF OBTAINING CERAMIC MATERIAL BASED ON PYROLYSIS RESIDUE OF MUNICIPAL SOLID WASTE

M. M. Chizhikova¹, O. B. Kolibaba²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

² tevp@tvp.ispu.ru

Abstract. The paper discusses the heat technology for producing a ceramic material. The solid residue of municipal waste pyrolysis was used as an additive. The proposed heat technology allows you to obtain building ceramic products that meet the requirements of GOST 530–2012.

Keywords: thermal technology, municipal solid waste, ceramic mass, low-melting clay, solid residue of pyrolysis

Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике невозможен без создания и применения на практике новых энергоэффективных безотходных технологий, предусматриваю-

щих комплексную переработку органических отходов, в т. ч. твердых коммунальных, являющихся практически бесплатным углеводородным сырьем.

В связи с этим задачей настоящего исследования является применение продуктов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) в строительной отрасли на основе использования современных безотходных экологически безопасных технологий переработки ТКО.

Широко известно использование при производстве строительных керамических изделий отходов промышленности — различных видов золы, получаемых как продукт сжигания топлива на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ), тепловых электростанциях (ТЭС), предприятиях металлургической промышленности, что не только уменьшает себестоимость строительных материалов, но и позволяет существенно снизить загрязнение окружающей среды.

Целью работы является разработка теплотехнологии получения керамического материала [1; 2] на основе твердого пиролизного остатка ТКО, который используется в качестве добавки. Структурная схема теплотехнологии приведена на рис. 1.

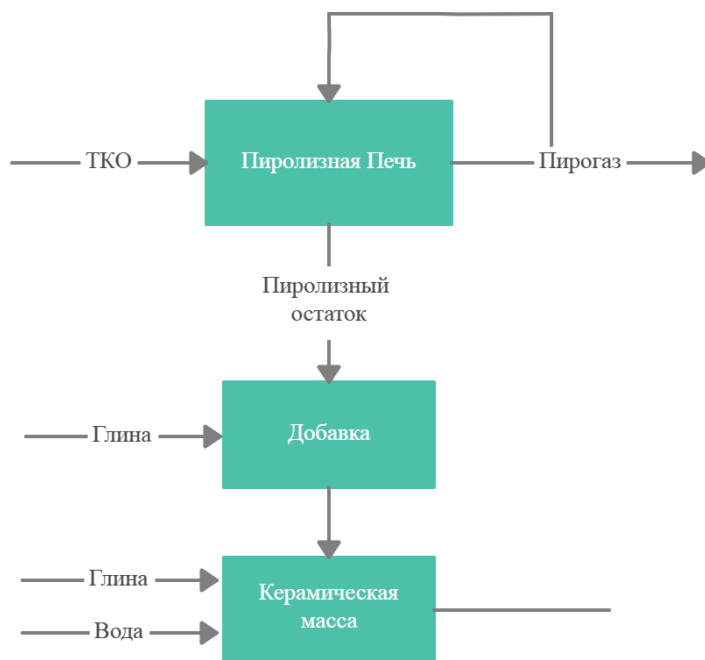


Рис. 1. Структурная схема теплотехнологии получения керамики

Для приготовления мелкодисперсной добавки использовались частично-сортированные ТКО среднего морфологического состава (без пластика), при следующем соотношении компонентов, мас. %: пищевые отходы — 48,6; бумага и картон — 41,7; текстиль — 6,9; дерево — 1,4; кожа и резина — 1,4.

Пиролиз частично сортированных ТКО указанного состава осуществлялся в печи при температуре 700 °С. Образовавшийся твердый остаток пиролиза измельчался при помощи шаровой мельницы до получения тонкодисперсного порошка.

Легкоплавкую глину влажностью 20–22 % измельчили при помощи камневыделительных вальцов до размеров кусков 70–75 мм. Затем в тангенциальной молотковой мельнице (ММТ) осуществлялись тонкий помол и его сушка до влажности 3 %. Подготовленные таким образом компоненты мелкодисперсной добавки дозировались в пропорции: твердый остаток пиролиза частично сортированных твердых коммунальных отходов — 20 %, легкоплавкая глина — 80 %. Затем их перемешивали до получения однородной смеси в смесителе. Увлажненная до 10 % порошковая смесь формовалась в брикеты на гидравлическом прессе при давлении 15 МПа. Образцы высушивались при температуре 100 °С до влажности 3 %, а затем обжигались в печи при температуре 1000 °С. После обжига зернистый материал размалывался до частиц размером не более 0,1 мм, получая, таким образом, мелкодисперсную добавку.

Для приготовления керамической массы использовалась легкоплавкая умеренно-пластичная глина. Предварительно размолотая глина с размером частиц не более 0,1 мм и мелкодисперсная добавка дозировались в требуемых количествах, смешивались и увлажнялись до 10 %. Из полученной массы при помощи гидравлического пресса формировались образцы при давлении 25 МПа, которые затем высушивались при температуре 100 °С, а потом обжигались при температуре 1050 °С.

После обжига проводились испытания образцов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Химический состав образцов был определен на основе рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3 М. Усредненный химический состав образцов имеет следующий вид: SiO_2 — 53,7 %; $\text{Al}_3\text{Ca}_{0,5}\text{Si}_3\text{O}_{11}$ — 21,1 %; Fe_2O_3 — 10,7 %; $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ — 14,5 %.

Таким образом, применение предлагаемой технологии позволяет получить строительную керамику, удовлетворяющую требованиям

ГОСТ 530–2012 [3], расширить сырьевую базу и утилизировать твердые коммунальные отходы.

Список источников

1. Попов К. Н., Каддо М. Б. Строительные материалы и изделия. М. : Высшая школа, 2001. 367 с.
2. Юшкевич М. О., Роговой М. И. Технология керамики. М. : Стройиздат, 1969. 350 с.
3. ГОСТ 530–2012. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. М. : Стандартиформ, 2013. 28 с.

УДК 628.4.032

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

С. Э. Шавадзе¹, О. Б. Колибаба²

^{1,2} Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

¹ salomeshavadze@yandex.ru

Аннотация. В работе предложена модель структуры слоя твердых коммунальных отходов (ТКО). Рассчитаны эффективные теплофизические свойства: плотность, средняя удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности ТКО. Построены зависимости эффективных теплофизических свойств ТКО от температуры.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, теплофизические свойства, плотность, средняя удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности

INVESTIGATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MUNICIPAL SOLID WASTE

S. E. Shavadze¹, O. B. Kolibaba²

^{1,2} Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

¹ salomeshavadze@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a model of the structure of the layer of municipal solid waste (MSW). The effective thermophysical properties are calculated: density, average specific heat and coefficient of thermal conductivity. Dependences of thermal properties of MSW on temperature are constructed.

Keywords: municipal solid waste, thermal properties, density, heat capacity, coefficient of thermal conductivity

Жизнедеятельность человека связана с появлением большого количества различных отходов. В последние десятилетия

произошел резкий рост потребления, что привело к значительно-му увеличению объемов образования твердых коммунальных отходов (ТКО).

ТКО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, включающую в себя: пищевые и растительные отходы, макулатуросодержащие и текстильные компоненты, пластмассы, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стеклобой, камни, кости [1].

В качестве модели слоя ТКО можно принять многокомпонентную структуру, которая обладает эффективными теплофизическими свойствами: плотностью, теплоемкостью и коэффициентом теплопроводности.

В задачу настоящего исследования входит изучение влияния температуры на теплофизические свойства коммунальных отходов.

В качестве модели структуры слоя ТКО рассматривается трехкомпонентная структура с вкраплениями [1]. Принято следующее ограничение: рассмотрены компоненты, которые имеют наибольшую долю в смеси ТКО (пищевые отходы, бумага и текстиль с процентным содержанием каждого отдельного компонента в смеси 50, 42 и 8 % соответственно).

Расчеты эффективных теплофизических свойств выполнены с использованием формул, представленных ниже.

Эффективный коэффициент теплопроводности трехкомпонентной смеси рассчитан по формуле Г. Н. Дульнева:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \left\{ \frac{r_2}{1-r_1} \left[1 - \frac{1-r_1}{\frac{1}{1-\nu_{12}} - \frac{r_1}{3}} \right] + \frac{r_3}{1-m_1} \left[1 - \frac{1-r_1}{\frac{1}{1-\nu_{13}} - \frac{r_1}{3}} \right] \right\},$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности пищевых отходов, Вт/(м · °С); r_1, r_2, r_3 — объемные доли пищевых отходов, бумаги и текстиля соответственно;

$$\nu_{12} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

$$\nu_{13} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1},$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности пищевых отходов, Вт/(м · °С); λ_2 — коэффициент теплопроводности бумаги, Вт/(м · °С); λ_3 — коэффициент теплопроводности текстиля, Вт/(м · °С).

Средняя удельная эффективная теплоемкость ТКО:

$$c_{\text{эф}} = \sum c_i g_i = c_1 g_1 + c_2 g_2 + c_3 g_3,$$

где c_1, c_2, c_3 — средние удельные теплоемкости пищевых отходов, бумаги и текстиля соответственно, Дж/(кг · °С); g_1, g_2, g_3 — массовые доли пищевых отходов, бумаги и текстиля.

Эффективная плотность ТКО:

$$\rho_{\text{эф}} = \sum \rho_i g_i = \rho_1 g_1 + \rho_2 g_2 + \rho_3 g_3$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 — плотности пищевых отходов, бумаги и текстиля соответственно, кг/м³; g_1, g_2, g_3 — массовые доли пищевых отходов, бумаги и текстиля.

На рис. 1–3 представлены графические интерпретации зависимостей эффективных коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$, плотности $\rho_{\text{эф}}$ и средней удельной теплоемкости $c_{\text{эф}}$ от температуры.

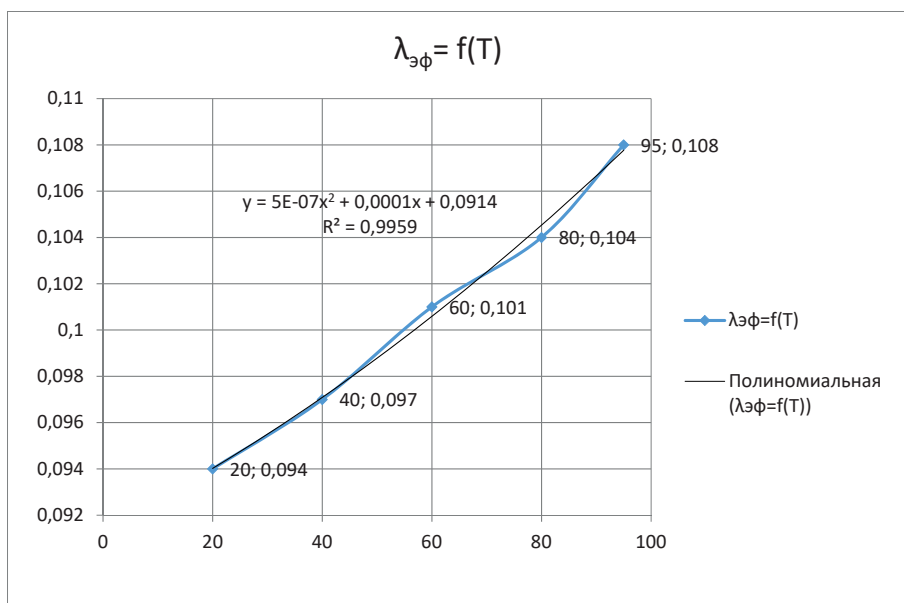


Рис. 1. Эффективный коэффициент теплопроводности в зависимости от температуры

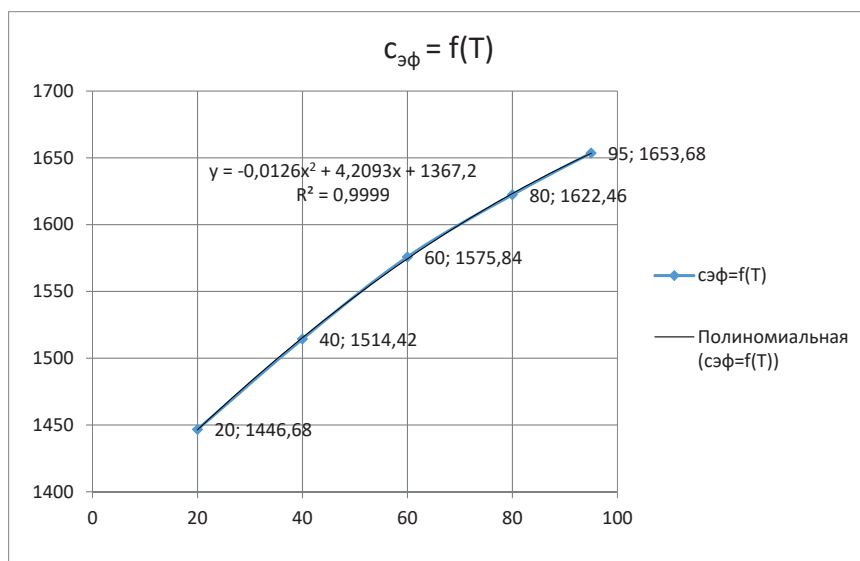


Рис. 2. Средняя удельная эффективная теплоемкость в зависимости от температуры

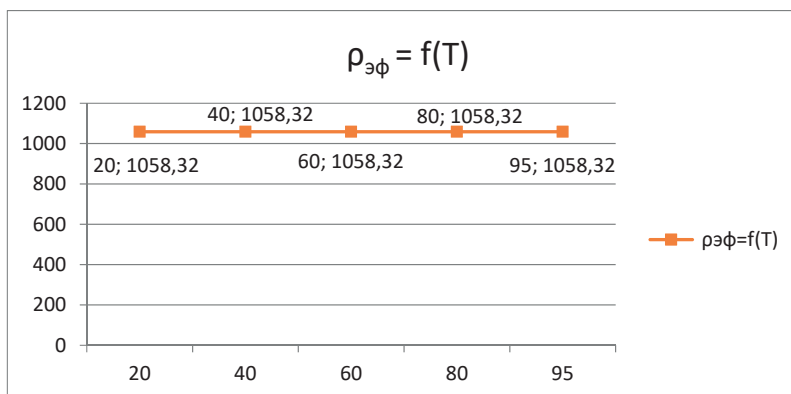


Рис. 3. Эффективная плотность в зависимости от температуры

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что эффективная плотность не зависит от температуры, а средняя удельная эффективная теплоемкость и эффективный коэффициент теплопроводности с увеличением температуры резко возрастают.

Список источников

1. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов : справ. книга. Л. : Энергия, 1974. 264 с.

УДК 666.3.046

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ОТОЩЕННЫХ ЗОЛОЙ ТЭС

К. С. Шанина¹, Е. В. Жбанова², Е. В. Гусев³

^{1,2} Ивановский государственный политехнический университет,
Иваново, Россия

³ Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

¹ ksusha-shanina@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена оценка протекающих физико-химических процессов при обжиге керамических изделий с использованием техногенного сырья на стадии нагрева. Приведены графические зависимости термического анализа глинозольного материала.

Ключевые слова: техногенные отходы, зола, глина, глинозольная керамика, обжиг, температура

TECHNOLOGICAL FEATURES OF FIRING CERAMIC PRODUCTS EMACIATED WITH TPP ASH

K. S. Shanina¹, E. V. Zhbanova², E. V. Gusev³

^{1,2} Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

³ Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, Ivanovo, Russia

¹ ksusha-shanina@mail.ru

Abstract. The paper considers the assessment of the ongoing physical and chemical processes during the firing of ceramic products using technogenic raw materials at the heating stage. The graphical dependences of the thermal analysis of the alumina material are presented.

Keywords: technogenic waste, ash, clay, alumina ceramics, roasting, temperature

Одним из перспективных направлений в керамической промышленности является использование местных техногенных отходов от сжигания твердых топлив в котельных в качестве одного из основных сырьевых материалов в производстве стеновых керамических изделий. Это связано со схожими химическими составами легкоплавких глин и зол, возможностью повышения отошающей части керамических масс, использованием зол как топливосодержащей добавки. Следствием этих особенностей является снижение энергетических затрат при термической обработке [1; 2].

Обжиг полуфабриката пластического формования из глинозольной композиции является энергоемким технологическим процессом, интенсивность протекания которого связана не только с режимными тепловыми воздействиями, но с влиянием выгорающих частиц несгоревшего топлива, структурно-фазовыми изменениями, определяющими физико-механические свойства продукции и энергоэффективность тепловой обработки [3].

Исследование физико-химических процессов, происходящих при нагреве керамических изделий-сырцов, и оценка качественного состава выделяющихся компонентов газовой фазы способствуют выбору оптимальных режимов термообработки для получения материала с заданными свойствами.

Цель настоящей работы — изучение особенностей физико-химических процессов, протекающих при обжиге керамических изделий с использованием техногенного сырья без применения традиционных природных материалов.

В качестве отошителя и частично выгорающей добавки в керамической массе использовалась тонкодисперсная золошлаковая смесь (ЗШС) гидроудаления тепловой электростанции с размером частиц менее 0,125 мм. В качестве связующего для получения керамического материала использовалась легкоплавкая глина (число пластичности 10–13).

В таблице приведены химические составы компонентов смеси. Экспериментальные исследования процесса нагрева (обжига) глинозольного материала состава Г: З = 60 : 40 (мас. %) выполнялись при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH, который состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 C Aeolos и блока импульсного термического Pulse TA.

Таблица

Химический состав компонентов глинозольной шихты (мас. %)

Компо- ненты	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	Потери при про- каливании
ЗШС	54,16	13,1	9,88	3,23	1,14	—	2,76	14,65
Глина	76,87	7,7	3,5	0,7	—	0,36	—	3,6

На рис. 1 приведены термогравиметрическая (ТГ) и дифференциально-сканирующая калориметрическая (ДСК) кривые термического анализа глинозольного материала в интервале температур 20–950 °С при скорости подъема температуры (ПТ) среды 5 °С/мин.

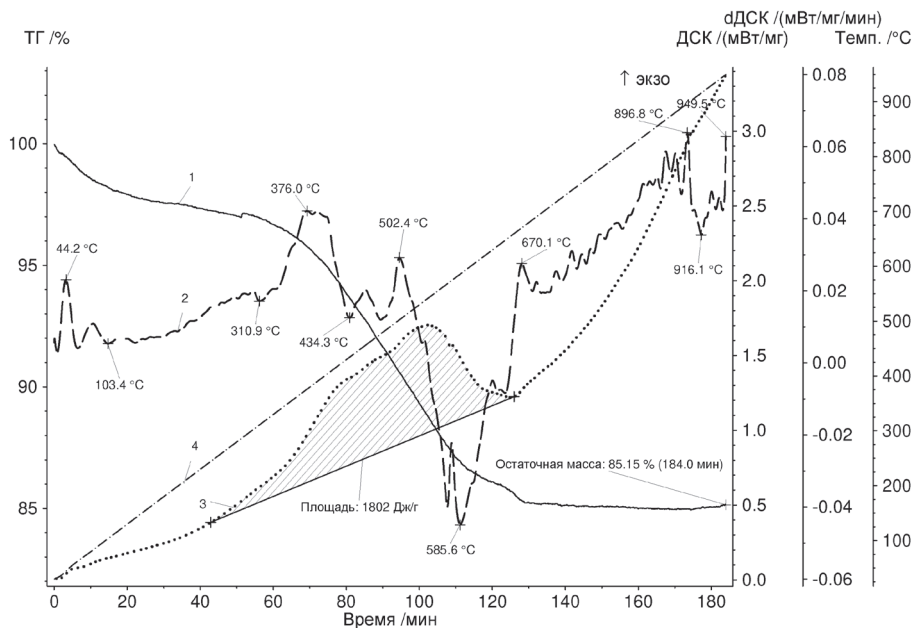


Рис. 1. ТГ- и ДСК-кривые во времени нагрева глинозольного материала состава Г : З = 60 : 40:

1 — ТГ; 2 — dДСК; 3 — ДСК; 4 — ПТ

По данным ТГ, установлены температура и интервал времени, при которых происходит максимальное уменьшение массы; по данным ДСК, определено количество теплоты, выделяющейся в результате химических реакций. Потери глинозольной массы в температурном

интервале 20–700 °С составляют 15 %. Появление на кривой *d*ДСК (ДТА) в интервале температур 20–502 °С экзотермических эффектов связано с поглощением газов (окислением), удалением гидратной воды и окислением несгоревшего топлива, а также с наличием в золе аморфизированного глинистого вещества и ококсированных органических остатков. При повышении температур в интервале 502–670 °С наблюдаются эндотермические эффекты, связанные с термическим разрушением (диссоциацией) карбонатных и железистых примесей в шихте с выделением газообразных продуктов (H_2O , CO_2 , CO , O_2). В интервале температур 670–897 °С образуется окислительно-восстановительная газовая среда, способствующая необратимым полиморфным превращениям неустойчивых модификаций легкоплавких эвтектик (с образованием закиси железа FeO). Эндотермический эффект, начиная от 897 до 916 °С, переходит в экзотермический, вызывая появление жидкого расплава глинистых минералов за счет минерализующего действия щелочей.

Использование тонкодисперсной золошлаковой смеси в качестве отошающей и выгорающей добавки для керамических изделий в процессе обжига приводит к возникновению дополнительного внутреннего источника тепла, а наличие оксидов Fe_2O_3 и R_2O способствует спеканию глинозольных изделий, что дает возможность интенсифицировать протекание процесса обжига и повысить его энергоэффективность.

Список источников

1. Сайбулатов С. Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС. М. : Стройиздат, 1990. 243 с.
2. Теплоизоляционные керамические материалы с нанопористой структурой, изготовленные с использованием золосодержащих отходов ТЭЦ / Т. В. Вакалова [и др.] // Сырьевые материалы. 2014. № 12. С. 6–11.
3. Гусев Е. В., Сокольский А. И. Оценка возможности использования местных сырьевых материалов для производства глинозольного кирпича // Сборник науч. тр. по материалам круглого стола, посвящен. науч. шк. акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. С. В. Федосова. Иваново, 2013. С. 74–76.

УДК 66.02

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И РАЗМЕР ПОР ОКСИДА КАЛЬЦИЯ

И. Б. Шестаков¹, Е. А. Ткаченко², Т. Ф. Богатова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ shilyas1998@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на реакционную способность оксида кальция. Показано влияние типа исходного сырья на емкость поглощения углекислого газа. Изучено влияние температуры, длительности прокаливания и состава дутья на удельную поверхность и размер пор CaO. Показано влияние присутствия CO₂ на эти характеристики.

Ключевые слова: оксид кальция, удельная поверхность, размер пор, спекание

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE SPECIFIC SURFACE AND PORE SIZE OF CALCIUM OXIDE

I. B. Shestakov¹, E. A. Tkachenko², T. F. Bogatova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ shilyas1998@gmail.com

Abstract. The main factors affecting the reactivity of calcium oxide are considered in this paper. The influence of raw material type on carbon dioxide absorption capacity is shown. The influence of temperature, sintering time and composition of blowing on specific surface and pore size of CaO is studied. It is shown that the presence of CO₂ significantly affects these characteristics.

Keywords: calcium oxide, specific surface, pore size, sintering

В отходах ряда производств присутствуют щелочноземельные металлы в составе различных соединений. Так, в золе тепловых электростанций присутствуют CaO и MgO, способные вступать во вза-

имодействие с углекислым газом в процессе карбонизации. Применение этого процесса для сокращения выбросов CO_2 рассматривается в качестве одной из перспективных технологий. Ключевым фактором является реакционная способность оксидов.

Реакционная способность материала определяется прежде всего развитостью его реакционной поверхности. Рассмотрим основные факторы, влияющие на этот параметр.

Ранее было рассмотрено влияние типа материала, из которого получают CaO [1]. Для исследования использовали несколько типов предшественников CaO : порошок карбоната кальция, нитрат кальция, гидроксид кальция, а также оптически прозрачный монокристалл карбоната кальция. Кусок монокристалла был раздроблен и просеян с получением фракции 80–100 мкм. Остальные реагенты использовали без предварительной обработки. Предшественники прокаливали в муфельной печи при заданной температуре в течение 2 ч. Для исследования текстурных характеристик и динамической емкости полученные образцы CaO размалывали до фракции 0,5–1 мм (за исключением монокристалла). Динамическую емкость определяли методом ТГА (Netzsch 449 C). Навеска образца составляла около 20 мг. Сразу после взвешивания образцы нагревали в термовесах до 800 °С со скоростью 20 град · мин⁻¹ в токе аргона, после чего температуру образцов поддерживали постоянной. В изотермическом режиме при температуре 800 °С выполняли циклы «сорбция CO_2 — регенерация» с продолжительностью каждой стадии 900 с. На стадии сорбции подавалась смесь 67 % Ar и 33 % CO_2 , на стадии регенерации — чистый аргон. Динамическая емкость C_{dyn} определялась как разность масс образца в конце стадий сорбции и регенерации, нормированная на начальную массу CaO .

Эксперименты показали, что емкость поглощения зависит от температуры прокаливания. Например, для CaO , полученного разложением гидроксида кальция и прокаленного при 1200 °С, в первом цикле емкость составила около 2 % (мас.), а для CaO , прокаленного при 900 °С — около 40 % (мас.).

Кроме того, исследовалось влияние температуры, времени спекания и концентрации CO_2 [2]. Использовался необработанный известняк (95,8 % CaCO_3), после измельчения использовали в экспериментах фракцию от 0,71 до 1 мм. CaO получали прокаливанием в азоте 1 г образца в микрореакторе от 4 до 70 мин в зависимости от температуры прокаливания (от 973 до 1173 К).

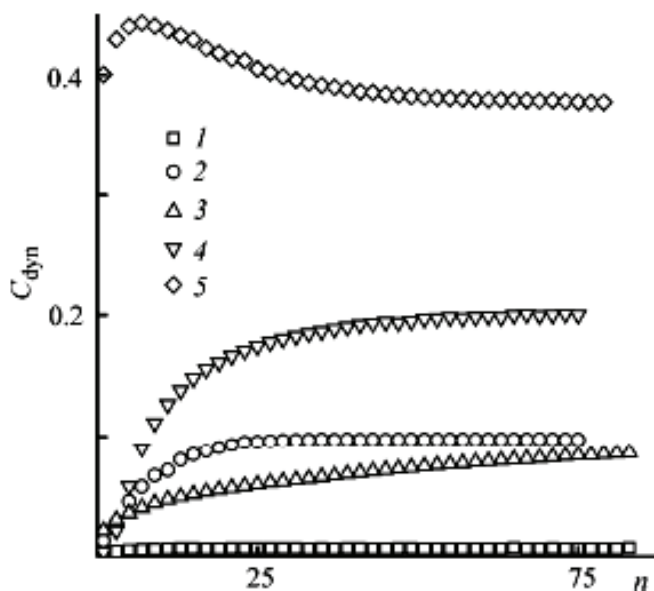


Рис. 1. Зависимость динамической емкости C_{dyn} (г $\text{CO}_2/\text{г}$) различных образцов CaO от номера цикла n в термогравиметрических экспериментах:

1 — монокристалл CaCO_3 , 1200 °C; 2 — порошок CaCO_3 , 1300 °C; 3 — $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 1200 °C; 4 — $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 1200 °C; 5 — $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 900 °C

Исследование влияния температуры при спекании в различных средах (N_2 или в присутствии CO_2) показало, что при спекании в азоте наблюдается значительное увеличение радиуса пор с увеличением времени спекания при 1123 и 1173 К, рис. 2, *а*. При более низких температурах этот эффект малозаметен. На удельную поверхность влияет спекание при всех температурах, рис. 3, *а*. В присутствии CO_2 (15 %) температура не оказывает столь заметного влияния на радиус пор и удельную поверхность в процессе спекания, рис. 2, *б*, рис. 3, *б*.

Влияние CO_2 на радиус пор и удельную поверхность в процессе спекания частиц CaO при 1073 К показано на рис. 4. Радиус пор при спекании CaO в присутствии CO_2 значительно увеличивался — примерно от 5 ($\text{CO}_2 = 5\%$) до 15 ($\text{CO}_2 = 15\%$) раз, тогда как при спекании в азоте радиус пор практически не изменялся. Удельная поверхность на первом этапе спекания быстро уменьшается — от 32,6 $\text{м}^2/\text{г}$ при $t = 0$ до 10 $\text{м}^2/\text{г}$ за 10 мин. в процессе спекания при $\text{CO}_2 = 15\%$. Аналогичное уменьшение происходит и для других концентраций CO_2 , в отличие от того, что наблюдалось при спекании в среде N_2 .

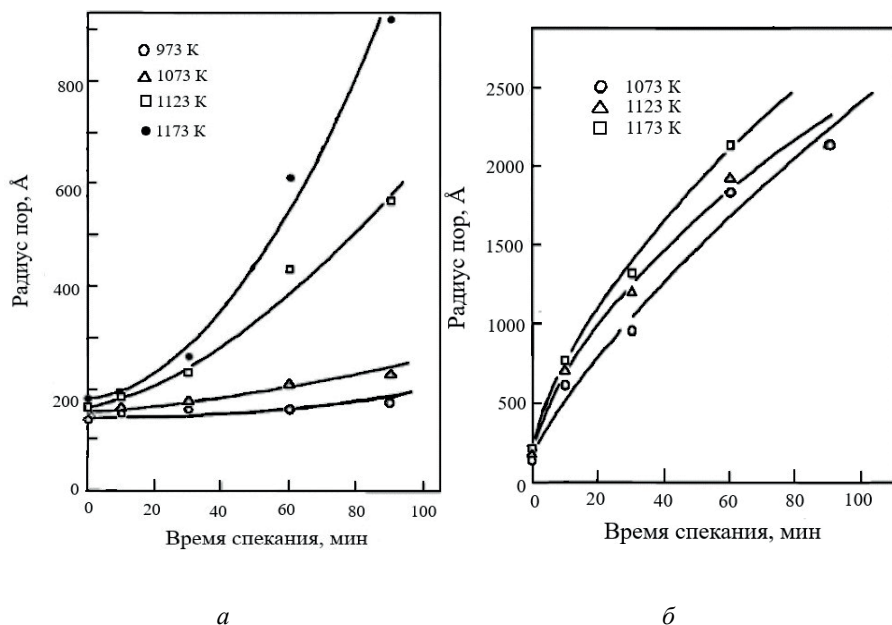


Рис. 2. Изменение радиуса пор в процессе спекания CaO при различных температурах:

a — в азоте, *б* — в присутствии CO₂ = 15%

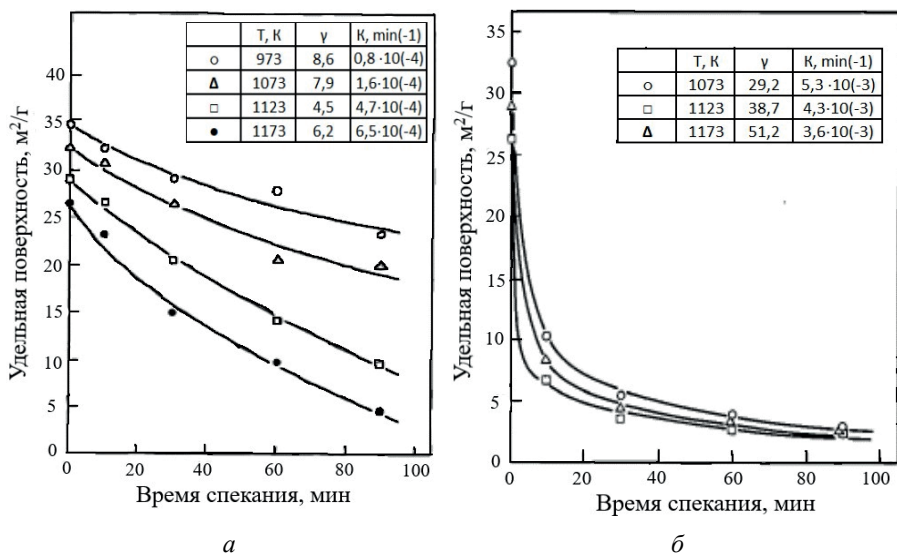


Рис. 3. Изменение удельной поверхности в процессе спекания CaO при различных температурах:

a — в азоте, *б* — в присутствии CO₂ = 15%

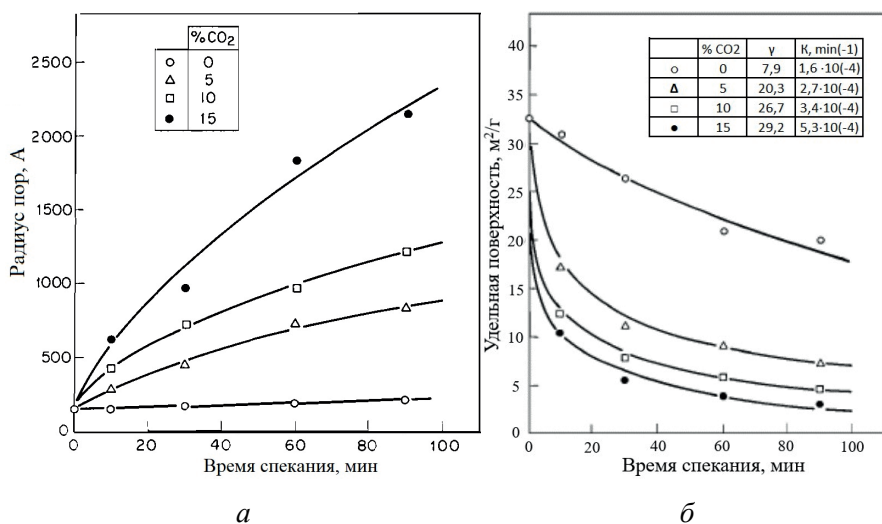


Рис. 4. Изменение радиуса пор и удельной поверхности в процессе спекания CaO при различных концентрациях CO₂ ($T = 1073$ K)

Для определения удельной поверхности с учетом времени спекания была предложена [2] следующая зависимость, выведенная с использованием модели Германа — Мунира (German — Munir):

$$S = S_0 - (S_0 - S_c) \left[1 + Kt \left(\frac{S_0}{S_0 - S_c} \right)^\gamma \right]^{1/\gamma},$$

где S_0 — удельная поверхность исходного CaO (принято $104 \text{ м}^3/\text{г}$ [3]); S_c — удельная поверхность частицы CaO в конце прокаливания; K — постоянная спекания как функция температуры; γ — параметр, значение которого зависит от типа механизма переноса между зернами в процессе спекания.

Список источников

1. Окунев А. Г., Лысиков А. И. Влияние текстуры прокаленного оксида кальция на его сорбционную емкость в циклах сорбция CO₂-регенерация // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84, вып. 2. С. 177–182.
2. Surface area and pore size changes during sintering of calcium oxide particles / A. B. Fuertes [et al.] // Chemical Engineering Communications. 1991. Vol. 109, iss. 1. P. 73–88.
3. Borgwardt R. H. Sintering of nascent calcium oxide // Chemical Engineering Science. 1989. Vol. 44 (1). P. 53–60.

УДК 66.02

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ

И. Б. Шестаков¹, Т. Ф. Богатова², П. В. Осипов³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ shilyas1998@gmail.com

Аннотация. Изучено влияние условий термической обработки исходного сырья и прокаливания образцов оксида кальция на изменение удельной поверхности и размера пор CaO, определяющих его реакционную способность. Показано, что положительное влияние на эти характеристики оксида кальция оказывают увеличение температуры в определенном диапазоне и длительности прокаливания. Выявлено, что при контактировании с воздухом происходит снижение удельной поверхности и суммарного объема пор оксида кальция.

Ключевые слова: оксид кальция, удельная поверхность, размер пор, прокаливание

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT CONDITIONS ON CALCIUM OXIDE CHARACTERISTICS

I. B. Shestakov¹, T. F. Bogatova², P. V. Osipov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ shilyas1998@gmail.com

Abstract. Influence of conditions of thermal processing of initial raw materials and calcination of calcium oxide samples on change of specific surface and pores size of CaO, defining its reactivity, is studied. It is shown that a positive effect on these calcium oxide characteristics has an temperature rise in a certain range and calcination duration. It is revealed that the specific surface and the total volume of calcium oxide pores are reduced during contact with air.

Keywords: calcium oxide, specific surface, pore size, calcination

При высоких температурах (973–1173 К) частицы известняка разлагаются, что приводит к образованию частиц CaO с высокой пористостью (~50 %).

Многочисленные исследования показали, что снижение реакционной способности CaO связано с уменьшением удельной поверхности в процессе термической обработки.

Характерный график распределения объема пор (для образца CaO , полученного при прокаливании в азоте при 1123 К) показывает (рис. 1), что распределение является бимодальным с двумя максимумами [1]. Первый максимум (~250 Å) соответствует истинным порам. Второй максимум (104 Å) связан с микротрещинами.

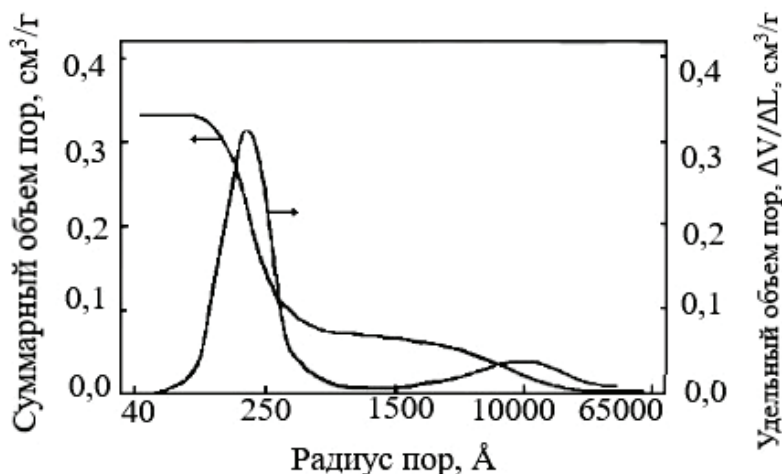


Рис. 1. Распределение объема пор для образца CaO ($T = 1123 \text{ К}$, $\text{CO}_2 = 0 \%$, $D_{\text{ч}} = 0,71\text{--}1,0 \text{ мм}$)

Только что прокаленные частицы CaO можно в идеале рассматривать как образованные небольшими сферическими зернами CaO , находящимися в точечном контакте. В этих условиях система не находится в равновесии. Приближение к равновесию требует объединения зерен за счет роста контактов между соседними зернами. Это приводит к уменьшению площади свободной поверхности. Это уменьшение может происходить из-за сжатия пор, связанного с усадкой частиц и снижением пористости [2]. Это также может происходить за счет роста пор без усадки частиц.

CaO имеет начальную удельную поверхность $104 \text{ м}^2/\text{г}$ [2]. Известно, что удельная поверхность $S_{\text{уд}}$ частиц CaO , образующихся при

прокаливании частиц известняка размером более 1 мм, редко превышает $35 \text{ м}^2/\text{г}$. При прокаливании в азоте удельная поверхность и радиус пор полученных образцов CaO составили от $34,9 \text{ м}^2/\text{г}$ и 147 \AA при 973 К до $26,6 \text{ м}^2/\text{г}$ и 184 \AA при 1173 К . Это означает уменьшение $S_{\text{уд}}$ от 66 до 74% по сравнению с ранее приведенным значением ($104 \text{ м}^2/\text{г}$). Очевидно, что разложение известняка и спекание зерен образовавшегося CaO происходят одновременно. Этот факт обусловлен тем, что для обжига частиц размером 1 мм требуется больше времени по сравнению с мелкими частицами ($<10 \text{ мкм}$). Кроме того, CO_2 , образующийся внутри частицы, при диффузии наружу ускоряет спекание зерен CaO . После завершения прокаливания спекание частицы CaO продолжается.

Изменения текстуры в процессе спекания связано с усадкой частиц известняка во время прокаливания. Эту усадку SR можно оценить по формуле Бойнтон (Boynton):

$$SR = 100 \cdot [1 - (1 - LI)d_L / d_C],$$

где LI — потеря массовой доли при прокаливании известняка; d_L и d_C — кажущаяся плотность известняка и кальцинированного образца соответственно.

Усадка кальцинированных образцов, оцененная согласно формуле, представленной выше, составляет 9–14%, не изменяясь при этом с температурой кальцинирования. В процессе спекания время и особые условия процесса спекания (концентрация CO_2 и температура) не увеличивают усадку, наблюдаемую в конце прокаливания.

Во время спекания мелких частиц CaO (полученных прокаливанием 2 мкм частиц известняка) пористость этих частиц, как и удельная поверхность, сильно уменьшается [2]. Основываясь на этом факте, была предложена модель, объясняющая спекание частиц. Предлагаемая модель рассматривает первую стадию (induction period), в течение которой пористость практически не уменьшается, а спекание сопровождается кластеризацией зерен. В дальнейшем пористость быстро уменьшается из-за усадки. Для частиц размером около 1 мм было выдвинуто предположение, что зерна CaO спекаются, образуя «кластеры», а поры превращаются из межзеренных отверстий в «межкластерные» отверстия. Кластеры спекаются, образуя более крупные формации. Процесс происходит без усадки.

Исследование влияния условий термической обработки гидроксидов кальция Ca(OH)_2 в качестве исходного материала на формирова-

ние удельной поверхности и структурных характеристик получаемого СаО показали [3], что повышение температуры от 723 до 823 К при одном и том же времени прокаливания (4 ч) сопровождается увеличением удельной поверхности продукта термического разложения гидроксида кальция от 14 до 36 м²/г; уменьшение длительности прокаливания с 4 до 1 ч при одной и той же температуре (823 К) приводит к снижению $S_{уд}$ получаемого продукта с 36 до 25 м²/г. Прокаливание Са (ОН)₂ в среде азота практически не влияет на величину $S_{уд}$, в то время как прокаливание в вакууме позволяет получить СаО с более развитой поверхностью. Так, у СаО, полученного при разложении Са (ОН)₂ в вакууме при 823 К в течение 1 ч, $S_{уд} = 85$ м²/г, что в 3,5 раза выше, чем у образца, прокаленного в токе воздуха при аналогичных температуре и длительности обработки. При этом для образцов СаО, прокаленных в вакууме, $S_{уд}$ уменьшается с течением времени при их хранении на воздухе, при этом основное изменение происходит в первые часы (5–6 ч) их контактирования с воздухом, последующее пребывание на воздухе оказывает существенно меньшее влияние на $S_{уд}$. Увеличение скорости нагрева, как и выделяющийся при разложении водяной пар, оказывает отрицательное воздействие на дисперсность СаО.

Список источников

1. Surface area and pore size changes during sintering of calcium oxide particles / A. B. Fuertes [et al.] // Chemical Engineering Communications. 1991. Vol. 109, iss. 1. P. 73–88.
2. Borgwardt R. H. Sintering of nascent calcium oxide // Chemical Engineering Science. 1989. Vol. 44 (1). P. 53–60.
3. Влияние на удельную поверхность оксида кальция условий термической обработки / А. С. Иванова [и др.] // Неорганические материалы. Т. 34, № 4. С. 432–435.

УДК 621.184

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПЛАСТИНЧАТОГО ГАЗО-ГАЗОВОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ СРЕД

К. А. Щекотова¹, В. А. Микула²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ Shekotova61010@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены конструкции пластинчатых теплообменных аппаратов, а также приведены различные схемы движения сред в нем.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, пластины, рабочая среда, канал

DESIGN FEATURES OF PLATE GAS-GAS HEAT EXCHANGER AT HIGH MEDIA PRESSURES

K. A. Shchekotova¹, V. A. Mikula²

^{1,2} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ Shekotova61010@gmail.com

Abstract. In the work, the design of plate heat exchangers was considered, and various schemes of the movement of media in it were given.

Keywords: heat exchanger, plates, working environment, channel

Пластинчатые теплообменники относятся к классу рекуперативных теплообменников и представляют собой аппараты, теплообменная поверхность которых образована набором тонких штампованных металлических пластин с гофрированной поверхностью [1].

Пластины, собранные в единый пакет, образуют между собой каналы, по которым протекают теплоносители, обменивающиеся тепловой энергией. Газо-газовые теплообменные аппараты применяются

в качестве подогревателей воздуха и предназначены для повышения экономичности работы энергетического оборудования и использования теплоты вторичных энергетических ресурсов различных производств [2; 3].

Сами аппараты по конструкции могут быть односекционными, многосекционными или комбинированными. Односекционным пластинчатым теплообменником называется аппарат, в котором в теплообмене участвуют только две рабочие среды (рис. 1).

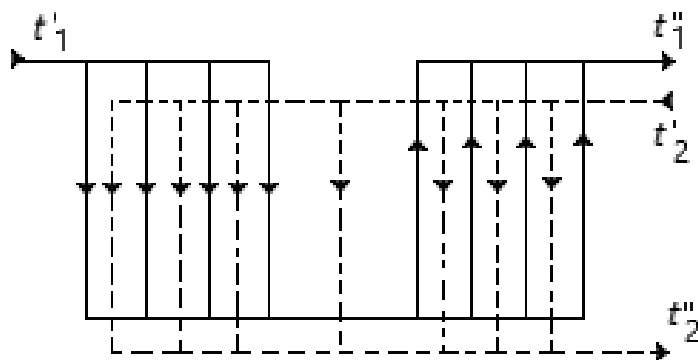


Рис. 1. Схема движения рабочей среды в односекционном пластинчатом теплообменнике

Относительное направление движения обеих рабочих сред через пластинчатый теплообменник может быть различным в зависимости от сочетания общих и частных направлений движения рабочих сред через аппарат в целом и через межпластинные каналы [4]. Различают следующие общие случаи, представленные на рис. 2.

В цикле Аллама используется рекуперативный теплообменник [5], передающий тепло от потока горячих выхлопных газов рециркулирующему потоку CO_2 под высоким давлением, который действует как гаситель разбавителя для продуктов сгорания (рис. 3).

Секция высокой температуры работает для охлаждения выхлопного потока турбины примерно от 700 до 550 °С. Он изготовлен из сплава 617, который способен выдерживать необходимую рабочую температуру под давлением 300 бар. Остальные три секции охлаждают выхлоп турбины до температуры на выходе около 60 °С. Они изготовлены из нержавеющей стали 316L.

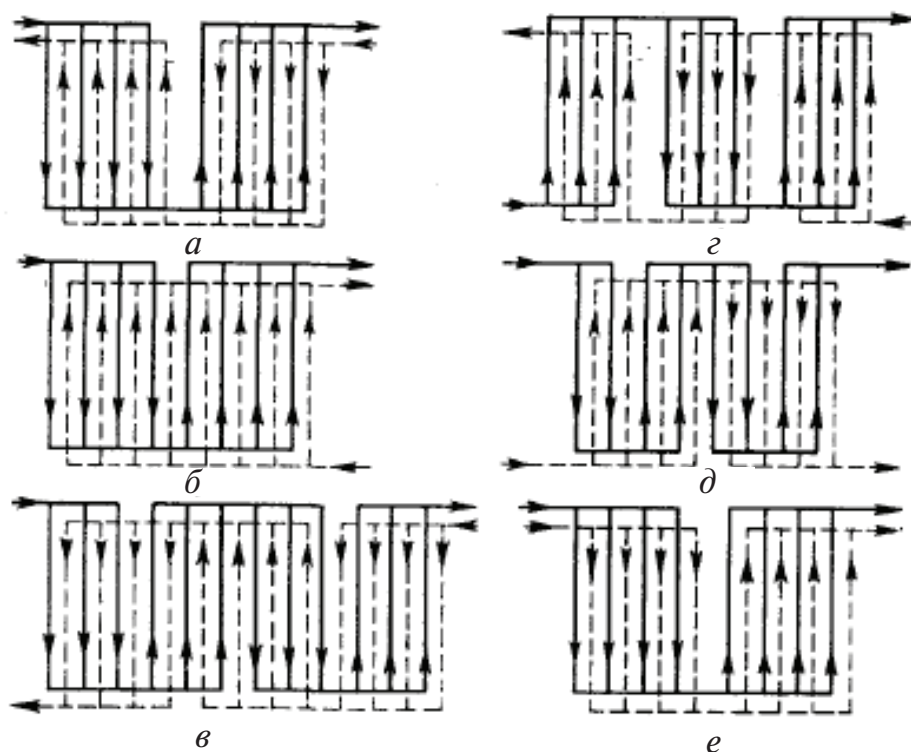


Рис. 2. Схемы направления движения рабочих сред в теплообменном аппарате:

- a* — частный противоток при общем противотоке, т. е. противоток и в каналах пакетов и в целом аппарате (чистый противоток); *б* — смешанный ток;
в — смешанный частный ток при общем противотоке; *г* — частный прямоток при общем противотоке; *д* — смешанный частный ток при общем прямотоке;
е — частный прямоток при общем прямотоке (чистый прямоток)

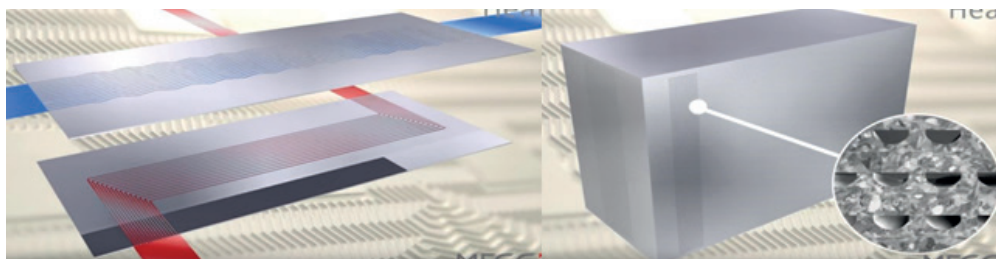


Рис. 3. Конструкция теплообменного аппарата

Каждый теплообменник изготовлен из отдельных пластин толщиной 1,69 мм, в которых расположены каналы диаметром 1,5 мм, позволяющие использовать противоточную, параллельную или многопроходную геометрию поперечного потока.

В дальнейшем ставится задача по моделированию теплообмена в данном рекуператоре.

Список источников

1. Барановский Н. В., Коваленко Л. М., Ястребенецкий А. Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М. : Машиностроение, 1973. 288 с.
2. Антуфьев В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М. ; Л. : Энергия, 1966. 184 с.
3. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М. : Энергоиздат, 1982. 360 с.
4. Иванов А. Н., Белоусов В. Н., Смородин С. Н. Теплообменное оборудование промпредприятий. СПб. : СПбГУПТД, 2016. 184 с.
5. Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture / R. Allam [et al.] // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. P. 5948–5966.

УДК 502/504

СРАВНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

О. Н. Яковлева¹, А. В. Верещагина², Н. А. Третьякова³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ olenka.yakovleva@bk.ru

Аннотация. В работе представлены методы термической утилизации твердых коммунальных отходов. Проведен сравнительный анализ методов. Предложен оптимальный способ утилизации твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: термические методы утилизации, переработка отходов, твердые коммунальные отходы

COMPARISON OF THERMAL METHODS OF MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL

O. N. Yakovleva¹, A. V. Vereshchagina², N. A. Tretyakova³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ olenka.yakovleva@bk.ru

Abstract. The article presents the methods of thermal utilization of solid municipal waste. A comparative analysis of the methods is carried out. The optimal way of utilization of solid municipal waste is proposed.

Keywords: thermal methods of disposal, recycling, solid municipal waste

В настоящее время наблюдается интенсивный рост количества отходов, как следствие, существует проблема обращения с ними. Основным методом утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является их захоронение на полигонах. За 2018 г. объем вывезенных ТКО на объекты захоронения составил 87 % от общего объема вывоза ТКО [1]. Учитывая тот факт, что действующие полигоны не справля-

ются с нагрузкой, а количество образующегося мусора постоянно растет, необходимо определить рациональный способ обращения с ТКО.

Для этого нужно сравнить основные методы переработки отходов. Термические методы утилизации отходов позволяют значительно уменьшить объем ТКО. Биологические методы могут быть применимы только к органической части ТКО, которая составляет в среднем 20–25 % от общего объема отходов. Обработка ТКО с выделением вторичного сырья также обладает невысокой эффективностью, большая часть отходов после сортировки направляется на полигоны. Далее будут рассматриваться именно термические методы переработки ТКО.

Самым простым и широко распространенным термическим методом утилизации ТКО является простое сжигание. Сжигание — процесс окисления необработанных отходов, содержащих органические вещества, который проводится в печах различных конструкций.

Основным недостатком сжигания является загрязнение окружающей среды. При горении органической фракции ТКО в атмосферу выбрасываются диоксид углерода, оксиды азота и серы, оксид углерода, бенз-а-пирен и диоксины, а также накапливается зола, в составе которой присутствуют тяжелые металлы в неподвижной форме. Для улавливания выбросов требуется дорогостоящая система очистки отходящих газов. При сжигании отходов образуются шлаки, которые требуют дальнейшей утилизации.

Другим недостатком метода является низкий коэффициент полезного использования тепловой энергии, который не превышает 65 %. Из этого следует, что простое сжигание не может рассматриваться как ресурсосберегающий и экологичный метод утилизации ТКО.

Альтернативой сжиганию является пиролиз — процесс термического разложения отходов при недостатке или отсутствии кислорода. В зависимости от соотношения продуктов пиролиз подразделяется на низкотемпературный (при температуре 450–900 °С) и высокотемпературный (свыше 900 °С). При низкотемпературном пиролизе из отходов образуется большое количество жидких продуктов и твердого остатка (полукокса) и значительно меньше пиролизного газа, при высокотемпературном — наибольший выход газа и минимум твердых и жидких веществ. Преимуществом метода является безопасность складирования и захоронения продуктов: тяжелые металлы не восстанавливаются, полностью превращаясь в золу. Процессы пиролиза также требуют необходимой очистки отходящих дымовых газов.

Образующийся пиролизный газ после подготовительных процессов, включающих фракционирование, осушку, очистку от примесей, направляется в качестве вторичного топлива в реактор, в результате чего в атмосферу вместе с отходящими газами выделяются загрязняющие компоненты, содержащиеся в синтез-газе. Однако количество отходящих газов при пиролизе отходов значительно меньше, чем при сжигании ТКО (до 3–5 раз) [2], поэтому затраты на газоочистку будут меньше.

Следующим методом является газификация — процесс термической обработки ТКО, содержащих органические вещества, в присутствии окислителя (воздуха, кислорода, водяного пара, и т. п.) с получением синтез-газа и твердого минерального продукта.

При газификации органические соединения, содержащиеся в отходах, подвергаются частичному окислению при высокой температуре (от 700 °С) с разложением углеродсодержащих элементов на твердый остаток, содержащий углерод, и летучие вещества: оксид углерода и водород (синтез-газ), которые направляются на обогрев реакторов газификации, а избытки — на выработку тепловой и электрической энергии. В процессе газификации происходит окисление токсичных соединений, содержащихся в ТКО, что требует применения дорогостоящего оборудования для очистки и осушки синтез-газа, очистки продуктов горения. Недостатком технологии также является низкий выход синтез-газа и высокое содержание тяжелых металлов в золе.

Менее изученной технологией является еще один термический метод — сжигание специально подготовленных отходов в виде гранулированного топлива RDF (Refuse Derived Fuel) в цементных печах. При использовании такого метода необходима предварительная сортировка ТКО и отбор пригодных фракций с последующей сушкой, прессованием и гранулированием для получения высококалорийного продукта, исключая содержание опасных при горении компонентов. Это требует дополнительных затрат на строительство сортировочных комплексов. Чтобы достичь экономического эффекта от применения RDF, необходимо устанавливать оборудование на действующих мусоросортировочных комплексах. Метод также окупается за счет большей теплотворной способности RDF по сравнению с природным газом, т. е. RDF-топлива, подаваемого в печи, требуется меньше. Сжигание RDF оказывает меньшее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с простым сжиганием, пиролизом и газификацией.

Это объясняется снижением до минимума содержания загрязняющих веществ в отходящих газах за счет проведения технологических процессов на цементном заводе при высокой температуре (приблизительно 1700 °С) [3], такой температуры нельзя достичь в установках альтернативных методов.

Таким образом, рассмотрев основные термические методы утилизации ТКО, можно сделать вывод, что оптимальным ресурсосберегающим и экологичным способом является сжигание RDF-топлива. Однако такая технология требует предварительной сортировки ТКО и дополнительного оборудования, т. к. в топливе не должно присутствовать опасных веществ. Широкое внедрение метода позволит утилизировать значительную часть отходов с получением продукта без ухудшения качества окружающей среды.

Список источников

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году : гос. доклад / М-во природ. ресурсов РФ, НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
2. Гунич С. В., Янчуковская Е. В., Днепровская Н. И. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов [Электронный ресурс] // Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология. 2015. № 2 (13). URL: http://journals.istu.edu/izvestia_biochemi/journals/2015/02/articles/6_2.pdf (дата обращения: 27.11.2020).
3. Бернадинер И. М., Александрова Е. Ю. Использование RDF и отработавших автомобильных покрышек в цементной печи [Электронный ресурс] // Вестник ПНИПУ. Приклад. экология. Урбанистика. 2018. № 2 (30). С. 47–59. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.02.04 (дата обращения: 27.11.2020).

Научное издание

**Энерго- и ресурсосбережение.
Энергообеспечение. Нетрадиционные
и возобновляемые источники энергии.
Атомная энергетика.
Даниловские чтения — 2020**

**Energy and Resource Saving.
Power Supply. Non-traditional
and Renewable Energy Sources.
Nuclear Energy.
Danilov Readings — 2020**

Ответственный за издание В. Ю. Балдин
Редактор К. А. Поташев
Верстка Е. В. Ровнушкиной

*Электронное сетевое издание
размещено в архиве УрФУ
<http://elar.urfu.ru>*

Подписано к публикации 08.12.2021. Формат 70×100 1/16.
Уч.-изд. л. 35,2. Объем данных 27,7 Мб.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru
<http://print.urfu.ru>

